



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

ULB

# **Entwicklung eines Simulationsmodells zur Beschreibung der Papierfeuchtereduzierung bei der Konvektionstrocknung im Rollenoffsetdruckverfahren**

Kühlmeyer, Lothar  
(1996)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00013552>

License:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Attribution

Publication type: Book

Division: 16 Department of Mechanical Engineering  
16 Department of Mechanical Engineering

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/13552>

---

**Entwicklung eines Simulationsmodells zur Beschreibung der  
Papierfeuchtereduzierung bei der Konvektionstrocknung im  
Rollenoffsetdruckverfahren**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Hochschule Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

**D i s s e r t a t i o n**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Lothar Kühlmeyer  
aus Großenhausen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Chr. Hars

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. W. Kast

Tag der Einreichung: 18.04.94

Tag der mündlichen Prüfung: 14.05.96

Darmstadt 1996



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während und nach meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Hochschule Darmstadt.

Herrn Prof. Dr. -Ing. Chr. Hars, dem Leiter des Fachgebiets, danke ich für die Bereitstellung und die Unterstützung bei der Beschaffung der erforderlichen Mittel, das entgegengebrachte Vertrauen, den gewährten Freiraum und den wissenschaftlichen Rat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Kast danke ich für das gezeigte Interesse und die Übernahme des Koreferates.

Besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. rer. nat. J. Rodriguez-Giles, der durch zahlreiche Anregungen, Hinweise und Diskussionen den Fortgang dieser Arbeit begleitete.

Mein Dank gilt darüber hinaus allen Kollegen, Mitarbeiterinnen, Mitarbeitern und Studenten des Fachgebiets, die stets hilfsbereit und tatkräftig zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Der Grundstein zu dieser Arbeit wurde während des von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) und der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V. (FGD) geförderten Forschungsvorhabens "Wärme- und Stofftransport an Trocknern und Kühlwalzen von Offset-Rollenrotationsmaschinen" gelegt, wofür diesen Institutionen und ihren Mitgliedsfirmen Dank gebührt.

Weitere Erwähnung verdient mein ehemaliger Kollege, Herr Prof. Dr.-Ing. C. Schuster, für die gute Zusammenarbeit bei dem zuvor genannten Forschungsvorhaben und die daraus resultierenden wichtigen Beiträge zu den im folgenden dargestellten Untersuchungen.

### Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, daß ich die vorliegende Arbeit -  
abgesehen von den ausdrücklich genannten Hilfen - selbständig  
angefertigt habe.

G. Cui

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Liste der verwendeten Symbole</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Problemstellung und Ziele der Arbeit</b>	<b>2</b>
2.1 Rollenoffsetverfahren und Druckfarbenverfestigung	2
2.1.1 Druckmaschine und Produktion der Druckerzeugnisse	2
2.1.2 Druck- und Trocknungsverfahren	3
2.2 Ziele der Arbeit	5
<b>3 Literaturübersicht</b>	<b>7</b>
<b>4 Modell der Transportvorgänge bei der Konvektionstrocknung</b>	<b>9</b>
4.1 Physikalische Grundlagen	9
4.1.1 Struktur des Papiers	9
4.1.2 Bindung des Wassers an das Papier	10
4.1.3 Transport des Wassers im Papier	11
4.2 Erhaltungsgleichungen	12
4.2.1 Stofferhaltungsgleichung	12
4.2.1.1 Gleichung des Stofftransports	15
4.2.2 Energieerhaltungsgleichung	18
4.3 Zeitableitungen der Temperatur und des Wasserdampf- partialdruckes	24
4.4 Sorptionsgleichgewicht	26
4.4.1 Gleichung der Sorptionsisothermen	26
4.4.2 Ableitung der Wasserbeladung nach dem Wasserdampf- partialdruck	28
4.4.3 Ableitung der Wasserbeladung nach der Temperatur	29
4.5 Äquivalenter Diffusionskoeffizient	30
4.5.1 Binärer und äquivalenter Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion	31

	Seite
4.5.2 Äquivalenter Diffusionskoeffizient für KNUDSENSche Molekularbewegung	32
4.6 Numerische Lösung der Differentialgleichungen	32
4.7 Anfangs- und Randbedingungen	34
4.7.1 Anfangsbedingungen	34
4.7.2 Randbedingungen	35
4.7.2.1 Partialdrücke des Wasserdampfes an den Papierrändern	35
4.7.2.2 Randtemperaturen	38
4.7.2.3 Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten	39
<b>5 Stoff- und Prozeßdaten</b>	<b>42</b>
5.1 Papierdaten	42
5.1.1 Mikroskopische Untersuchungen zur Papierdicke und -dichte	42
5.1.1.1 Probenpräparation und Mikroskopie	42
5.1.1.2 Dichte der Papiere	43
5.1.2 Porosität und Tortuositätsfaktor	45
5.1.3 Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität des Papiers	46
5.1.4 Konstanten des Sorptionsgleichgewichts	46
5.1.5 Feuchtebeladung der Papiere vor der Trocknung	49
5.2 Diffusionskoeffizienten	50
5.2.1 Binärer und äquivalenter Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion	50
5.2.2 Diffusionskoeffizient für Molekularbewegung nach KNUDSEN	51
5.3 Trocknerdaten	51
5.4 Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten	54
5.5 Verdunstung und Stoffwerte des Mineralöls	55
<b>6 Simulation des Wärme- und Stofftransports</b>	<b>58</b>
6.1 Relevante Größen über der Papierdicke	59
6.1.1 Bahntemperatur	59
6.1.2 Wasserdampfdruck	61
6.1.3 Wasserbeladung	62
6.2 Papierfeuchte und -temperatur während und nach der Trocknung	65
6.2.1 Einfluß der Trocknerverweilzeit	65
6.2.2 Einfluß der Trocknungslufttemperatur	68
6.2.3 Einfluß der flächenbezogenen Masse bzw. der Dicke des Papiers	71
6.2.4 Einfluß der Anfangsfeuchtebeladung	80

	Seite
6.2.5 Einfluß der Luftaustrittsgeschwindigkeit an den Trocknerdüsen	81
6.2.6 Einfluß der Wasserdampfpartialdichte der Trocknungsluft	86
6.3 Trockner mit mehreren Zonen	95
6.3.1 Heißluft-Mehrzonentrockner	95
6.3.1.1 Naturpapier	95
6.3.1.2 Gestrichenes Papier	96
6.3.2 Mehrzonentrockner mit Wasserdampf	99
6.3.2.1 Naturpapier	101
6.3.2.2 Gestrichenes Papier	102
6.3.2.3 Vergleich der Trocknungsmedien Heißluft und Wasserdampf	102
6.4 Vergleich von Rechnung und Messungen	107
6.4.1 Messungen an Produktionsmaschinen	107
6.4.2 Papiertemperatur und Wasserbeladung während der Trocknung	111
6.5 Anwendbarkeit bzw. Grenzen des Simulationsmodells	113
 7 Zusammenfassung	 116
 8 Literaturverzeichnis	 118

## Anhang

## Liste der verwendeten Symbole

$A_{AG}$	- Fläche des angeblasenen Bedruckstoffes	[m <sup>2</sup> ]
$A_{DA}$	- Fläche der Düsenöffnung	[m <sup>2</sup> ]
$D_{D,WL}$	- Äquivalenter Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{ij}$	- Diffusionskoeffizient zweier Komponenten i und j	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{iM}$	- Diffusionskoeffizient einer Komponente i in einem Gemisch mehrerer Komponenten	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{Kn}$	- Äquivalenter Diffusionskoeffizient für Molekularbewegung	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{Kn}'$	- Diffusionskoeffizient für Molekularbewegung	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{WL}$	- Äquivalenter Diffusionskoeffizient Wasserdampf - Luft im Papier	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{WL}'$	- Binärer Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion Wasserdampf - Luft	[m <sup>2</sup> /s]
$H$	- Gesamthalpie innerhalb eines Kontrollvolumens	[J/m <sup>3</sup> ]
$\dot{H}_r$	- Enthalpieänderung infolge chemischer Reaktion	[W/m <sup>3</sup> ]
$M_L$	- Molmasse der Luft	[kg/kmol]
$M_M$	- Molmasse des Mineralöls	[kg/kmol]
$M_W$	- Molmasse des Wassers	[kg/kmol]
$R$	- Allg. Gaskonstante	[J/(kmol K)]
$S_B$	- Oberfläche des Kontrollvolumens	[m <sup>2</sup> ]
$T$	- Temperatur	[K]
$T_\infty$	- Temperatur der Umgebung bzw. im Trockner	[K]
$T_1$	- Temperatur des unteren Papierbahnrandes	[K]
$T_{N+2}$	- Temperatur des oberen Papierbahnrandes	[K]
$T_G$	- Mittlere Temperatur in der Grenzschicht	[K]
$T_R$	- Mittlere Temperatur in der Papierrandschicht	[K]
$V_B$	- Kontrollvolumen	[m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}_L$	- Volumenstrom der Luft	[m <sup>3</sup> /h]
$X$	- Wasserbeladung des Bedruckstoffes	[kg/kg]
$X_0$	- Wasserbeladung des Bedruckstoffes vor dem Trockner	[kg/kg]
$X_{mono}$	- Monomolekulare Wasserbeladung des Bedruckstoffes	[kg/kg]

$X_v$	- Wasserbeladung des Bedruckstoffes vor dem Bedrucken	[kg/kg]
$a_L$	- Temperaturleitkoeffizient der Luft	[m <sup>2</sup> /s]
$b$	- Faktor der Sorptionsisothermen	
$b_0$	- Sorptionsgleichgewichtskonstante	
$b_D$	- Düsenöffnungsbreite	[m]
$c_{p,i}$	- Spez. Wärmekapazität der Komponente i in der Sorbatphase	[J/(kg K)]
$c_{p,aW}$	- Spez. Wärmekapazität des adsorbierten Wassers	[J/(kg K)]
$c_{p,B}$	- Spez. Wärmekapazität des Bedruckstoffes	[J/(kg K)]
$c_{p,i}$	- Spez. Wärmekapazität der Komponente i in der Gasphase	[J/(kg K)]
$c_{p,j}$	- Spez. Wärmekapazität der inerten Komponente j	[J/(kg K)]
$c_{p,L}$	- Spez. Wärmekapazität der Luft	[J/(kg K)]
$c_{p,MD}$	- Spez. Wärmekapazität des Mineralöldampfes	[J/(kg K)]
$c_{p,Mfl}$	- Spez. Wärmekapazität des flüssigen Mineralöls	[J/(kg K)]
$c_{p,S}$	- Spez. Wärmekapazität des Sorbens	[J/(kg K)]
$c_{p,WD}$	- Spez. Wärmekapazität des Wasserdampfes	[J/(kg K)]
$d$	- Mittlerer Papierporendurchmesser	[m]
$d'$	- Hydraulischer Durchmesser	[m]
$\dot{e}$	- Energiestromvektor über die Oberfläche	[W/m <sup>2</sup> ]
$h$	- Abstand Düsenöffnung zum Bedruckstoff	[m]
$h_{a,i}$	- Spez. Enthalpie der Komponente i in der Adsorbatphase	[J/kg]
$h_{ad,i}$	- Spez. Sorptionswärme der Komponente i	[J/kg]
$h_{ad,W}$	- Spez. Sorptionswärme des Wassers	[J/kg]
$h_{B,i}$	- Mittlere spez. Bindungsenth. der Komponente i	[J/kg]
$h_i$	- Spez. Enthalpie der Komponente i in der Gasphase	[J/kg]
$h_j$	- Spez. Enthalpie der inerten Komponente j	[J/kg]
$h_L$	- Spez. Enthalpie der Luft	[J/kg]
$h_S$	- Spez. Enthalpie des Sorbens	[J/kg]
$h_{V,i}$	- Spez. Verdampfungsenthalpie des Adsorbats	[J/kg]
$h_{V,M}$	- Spez. Verdampfungsenthalpie des Mineralöls	[J/kg]
$h_{V,M0}$	- Spez. Verdampfungsenth. des Mineralöls bei $\vartheta = 0^\circ\text{C}$	[J/kg]
$h_{V,W0}$	- Spez. Verdampfungsenthalpie des Wassers bei $\vartheta = 0^\circ\text{C}$	[J/kg]
$h_{WD}$	- Spez. Enthalpie des Wasserdampfes	[J/kg]
$k_{D,WL}$	- Konstante des Diffusionskoeffizienten	[N/(s K <sup>1,75</sup> )]
$l_T$	- Trocknerlänge	[m]

$m_B$	- Flächenbezogene Papiermasse	[kg/m <sup>2</sup> ]
$m_{MD}$	- Flächenbezogene verdunstete Mineralölmasse	[kg/m <sup>2</sup> ]
$\dot{m}_i$	- Vektor der Flußdichte der Komponente i	[kg/(m <sup>2</sup> s)]
$\dot{m}_j$	- Vektor der Flußdichte der Komponente j	[kg/(m <sup>2</sup> s)]
$\dot{m}_L$	- Massenstromdichte der Luft	[kg/(m <sup>2</sup> s)]
$\dot{m}_{WD}$	- Massenstromdichte des Wasserdampfes	[kg/(m <sup>2</sup> s)]
$\dot{m}_{MD}$	- Massenstromdichte (Trocknungsgeschwindigkeit) des Mineralöldampfes	[kg/(m <sup>2</sup> s)]
$p$	- Gesamtdruck	[Pa]
$p_{MD}''$	- Sättigungsdampfdruck des Mineralöldampfes	[Pa]
$p_{WD}$	- Partialdruck des Wasserdampfes	[Pa]
$p_{WD}''$	- Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes	[Pa]
$p_L$	- Partialdruck der Luft	[Pa]
$\dot{q}$	- Vektor der Wärmestromdichte	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{r}_i$	- Bildungsrate einer Komponente i	[kg/(m <sup>3</sup> s)]
$t$	- Zeit	[s]
$t_T$	- Trocknerverweilzeit des Bedruckstoffes	[s]
$w_D$	- Mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Luft	[m/s]
$w_i$	- Massenanteil einer Komponente i	
$y_{WD}$	- Molanteil des Wasserdampfes	
$\Lambda$	- Mittlere freie Weglänge der Moleküle	[m]
$\alpha$	- Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha^*$	- Wärmeübergangskoeffizient beeinflusst vom Stoffstrom	[W/m <sup>2</sup> K]
$\beta$	- Stoffübergangskoeffizient	[m/s]
$\beta^*$	- Stoffübergangskoeffizient beeinflusst vom Stoffstrom	[m/s]
$\varepsilon$	- Porosität	
$\vartheta$	- Temperatur	[°C]
$\lambda_B$	- Wärmeleitfähigkeit des Bedruckstoffes	[W/m K]
$\lambda_L$	- Wärmeleitfähigkeit der Luft	[W/m K]
$\mu$	- Diffusionswiderstandsfaktor im porösen Feststoff	
$\mu_{B,D}$	- Tortuositätsfaktor des Bedruckstoffes für Gasdiffusion	
$\mu_{B,Kn}$	- Tortuositätsfaktor des Bedruckstoffes für Molekularbewegung	



$v_D$	- Diffusionsvolumen	
$v_L$	- Dynamische Viskosität der Luft	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	- Gesamtdichte der Gase und Dämpfe	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{a,i}$	- Partialdichte einer Komponente i in der Adsorbatphase	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{a,W}$	- Partialdichte des adsorbierten Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_B$	- Dichte des trockenen Bedruckstoffes	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_i$	- Partialdichte einer Komponente i in der Gasphase	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{iges}$	- Gesamtdichte einer Komponente i	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_j$	- Partialdichte einer inerten Komponente j	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{jges}$	- Gesamtdichte einer inerten Komponente j	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_L$	- Partialdichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_S$	- Dichte des Sorbens	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{MD}$	- Partialdichte des Mineralöldampfes	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{MD\infty}$	- Partialdichte des Mineralöldampfes im Trockner	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{WD}$	- Partialdichte des Wasserdampfes	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{WD\infty}$	- Partialdichte des Wasserdampfes im Trockner	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_Z$	- Dichte der Zellulose	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	- Relative Feuchte der Luft	

## Dimensionslose Kennzahlen

$$Bi = \frac{\alpha^* s_B}{\lambda_B} \quad - \quad \text{BIOTsche Kennzahl für den Wärmetransport}$$

$$Bi^* = \frac{\beta^* s_B}{D_{WL}} \quad - \quad \text{BIOTsche Kennzahl für den Stofftransport}$$

$$Kn = \frac{\Lambda}{d} \quad - \quad \text{KNUDSENSche Kennzahl}$$

$$Nu = \frac{\alpha d'}{\lambda_L} \quad - \quad \text{NUSSELTsche Kennzahl}$$

$$Pr = \frac{\nu_L}{a_L} \quad - \quad \text{PRANDTLsche Kennzahl}$$

$$Re = \frac{w_D d'}{\nu_L} \quad - \quad \text{REYNOLDSSche Kennzahl}$$

$$Sc = \frac{\nu_L}{D_{WL}'} \quad - \quad \text{SCHMIDTsche Kennzahl}$$

$$Sh = \frac{\beta d'}{D_{WL}'} \quad - \quad \text{SHERWOODsche Kennzahl}$$

# 1 Einleitung

In der Drucktechnik wird zur Verfestigung der Farbschicht überwiegend die Konvektionstrocknung mit Heißluft eingesetzt. Dies gilt insbesondere für die Verfahren, bei denen der Bedruckstoff der Maschine in Form einer Rolle zugeführt wird. Hier sind der Tief-, der Flexo- und der Rollenoffsetdruck zu nennen.

Zumeist sind die Trockner mit Prallstrahldüsen ausgestattet. Dabei strömt die Heißluft aus Schlitzen oder Lochfeldern der Düsen mit Geschwindigkeiten von bis zu 80 m/s senkrecht auf den Bedruckstoff, wodurch sich hohe Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten einstellen. Das bedruckte Material wird rasch erwärmt und die ausgetriebenen Dämpfe von der Bahn abgeführt.

Die am häufigsten verwendeten Bedruckstoffe sind Naturpapiere, satinierte bzw. stark kalandrierte (SC) und gestrichene Papiere (LWC, HWC).

Papier ist den porösen Festkörpern zuzuordnen. Gase und Dämpfe können hinein-, hinaus- und hindurchdiffundieren.

Des weiteren ist Papier hygroskopisch, d. h. es besitzt die Fähigkeit, Flüssigkeiten an seiner inneren Oberfläche adsorptiv zu binden. Die Wasser- bzw. Feuchtebelastung (= Masse des Wassers/Masse des trockenen Papiers) beträgt unter normalen Umgebungsbedingungen (Temperatur  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ , rel. Luftfeuchtigkeit  $\phi = 50$  bis  $60\%$ ) je nach Papiersorte  $X = 4$  bis  $8\%$ .

Durch den Trocknungsprozeß wird Wasser desorbiert und aus dem Papier entfernt. Diese Form der Feuchteabstreibung, bei der der gesamte Bedruckstoff hygroskopische Feuchtigkeit aufweist, wird in der Trocknungstechnik als 3. Trocknungsabschnitt bezeichnet. Im Papier treten Versprödung, Schrumpfung, Blasen- und Wellenbildung auf. Die Folgen sind Schwierigkeiten bei der Weiterverarbeitung wie Bahnabrisse und Qualitätseinbußen am Druckprodukt.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines mathematischen Modells, mit dem die Berechnung der Temperatur- und Feuchteverläufe im Papier während des Trocknungsprozesses in Abhängigkeit der zahlreichen Einflußgrößen ermöglicht wird und Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt werden können. Die Untersuchungen werden am Beispiel des Rollenoffsetdrucks durchgeführt, da hier mit den höchsten Trocknungsluft- und Bahntemperaturen gearbeitet wird ( $\vartheta_L \leq 300^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_B \leq 190^\circ\text{C}$ ), und die genannten Probleme verstärkt auftreten.

## 2 Problemstellung und Ziele der Arbeit

### 2.1 Rollenoffsetverfahren und Druckfarbenverfestigung

#### 2.1.1 Druckmaschine und Produktion der Druckerzeugnisse

Rollenrotationsoffsetmaschinen gewinnen durch den in den letzten Jahren ständig gestiegenen Bedarf an Akzidenzdruckerzeugnissen zunehmend an Bedeutung. Die fortwährende Weiterentwicklung der Maschinen hat inzwischen zu Produktionsgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s geführt. Bild 2.1 zeigt die schematische Darstellung einer Rollenoffsetmaschine, die im wesentlichen aus Abwickler, Bahnspeicher, Einzugwerk, Druckwerken, Heißlufttrockner, Kühlwalzenständer und Falzapparat besteht.

In der Regel wird die Bedruckstoffbahn in vier bis fünf Doppeldruckwerken beidseitig Naß-in-Naß bedruckt und anschließend zur Austreibung der als Farbverdünnungsmittel zur Anwendung kommenden Mineralöle einem Heißluft-Prallstrahlschwebetrockner zugeführt. Diese Methode der Druckfarbenverfestigung wird beim Akzidenz-Rollenoffsetdruck wegen der Wärmezufuhr als "Heatset-Trocknung" bezeichnet. In einem dem Trockner nachgeschalteten Tunnel wird die an der Bahn haftende, mineralölbeladene Luftgrenzschicht durch mehrere Prallstrahldüsen abgerakelt (z. B. "Öldunstbläser" oder das "dynamische Grenzschichtrakel") und vom Papier weggeführt. Dieser Tunnel reicht in der Regel bis zum Einlaufbereich der Bahn auf die erste Kühlwalze.

Zur schadensfreien Weiterverarbeitung wird der Bedruckstoff mittels mehrerer

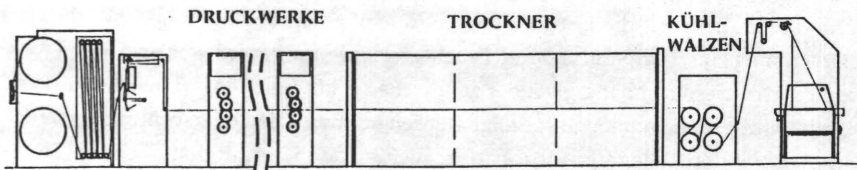


Bild 2.1: Schematische Darstellung einer Rollenoffsetmaschine

wasserdurchströmter, hochglanzpolierter Kühlwalzen auf Raumtemperatur abgekühlt.

Zwischen Kühlwalzenständer und Falzapparat sind häufig Silikonisieranlagen angebracht, um die ausgetrocknete und somit spröde gewordene Bahn für die Schneide- und Falzvorgänge an der Oberfläche geschmeidig zu machen und damit Bahnabrissen vorzubeugen.

### 2.1.2 Druck- und Trocknungsverfahren

Die Anforderungen an die Trocknung werden durch das Druckverfahren und die dabei eingesetzten Farben bestimmt. Im Gegensatz zum Flexo- und Tiefdruck, bei denen mit niedrig viskosen Farben und sog. Kurzfarbwerken (kurzer Weg vom Farbbehälter bis zum Bedruckstoff) gearbeitet wird, erfordert das Naßoffsetverfahren eine hohe Viskosität der Druckfarbe, um die einwandfreie Funktion zu sichern. Die Gründe dafür sind folgende:

1. Zwischen Farbe und Feuchtmittel wird eine hohe Viskositätsdifferenz benötigt, damit sich bei der Einfärbung die Flüssigkeitsspaltung an den nichtdruckenden Flächen des Plattenzylinders innerhalb der Feuchtmittelschicht vollzieht und diese damit farbfrei bleiben.
2. Die Druckfarbe muß sicher vom Plattenzylinder zum Gummituchzylinder und von dort auf den Bedruckstoff übertragen werden.
3. Die Phasentrennung Feuchtmittel - Farbe wird durch eine hohe Viskositätsdifferenz stabilisiert, d. h. die vollkommene Gemischbildung wird verhindert.

Zur Einstellung der im Offsetdruck üblichen Farbschichtdicke, die etwa bei 1  $\mu\text{m}$  pro Farbe liegt, werden wegen dieser verfahrensbedingten hohen Druckfarbenviskosität viele Spaltstellen und somit lange Farbwerke benötigt, die dadurch große Verdunstungsflächen aufweisen. Um das vorzeitige Austrocknen der Farbe auf den Farbwerkswalzen zu verhindern, kommen als Löse- bzw. Verdünnungsmittel Mineralöle mit Siedetemperaturen von  $\vartheta = 230$  bis  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  (bei  $p = 1\text{ bar}$ ) zum Einsatz. Für eine hinreichende Trocknung nach dem Drucken sind Temperaturen der Trocknungsluft von  $\vartheta = 180$  bis  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  erforderlich, wobei von einer Trocknerverweilzeit der Bahn von etwa 1 s ausgegangen wird. Zur Einhaltung dieser Verweilzeit wird pro 1 m/s Bahngeschwindigkeit mindestens

1 m Trocknerlänge benötigt, was bei schnellaufenden Maschinen inzwischen zu Trockenstrecken mit einer Länge bis zu 18 m geführt hat.

Im Auslauf des Trockners ist der Bedruckstoff in der Regel auf 110 bis 140 °C (in Extremfällen sogar auf 190 °C) aufgeheizt. Die Anfangsfeuchtebelastung der Bedruckstoffe - zumeist kommen stark kalandrierte (SC-) und gestrichene (LWC-, HWC-) Papiere wie auch Naturpapiere zur Anwendung - reduziert sich von 4 bis 8 % auf 0 bis 3 %.

Wegen der beidseitig aufgetragenen Farben, werden beim Rollenoffsetdruck Prallstrahlschwebetrockner (Bild 2.2) eingesetzt. Deren versetzt angeordnete Prallstrahldüsen dienen sowohl dem Wärme- und Stofftransport als auch dem berührungslosen Bahntransport durch den Trockner (Bild 2.3). Die Luft strömt mit Geschwindigkeiten von  $w_D \leq 80$  m/s aus den 2 bis 3 mm breiten Düsenöffnungen aus. Der Abstand zweier Düsenbalken beträgt in der Regel 200 bis 300 mm. Neuere Trockner werden mit zwei bis drei getrennten Temperaturzonen ausgestattet. Die vorderen Zonen werden zur schnellen Bahnaufheizung mit hohen Temperaturen von 200 bis 300 °C betrieben, wohingegen die letzte Zone zur Aufrechterhaltung der erforderlichen Bahntemperatur lediglich mit 140 bis 180 °C warmer Trocknungsluft arbeitet. Durch die (gegenüber Trocknern älterer Bauart mit einer einzigen

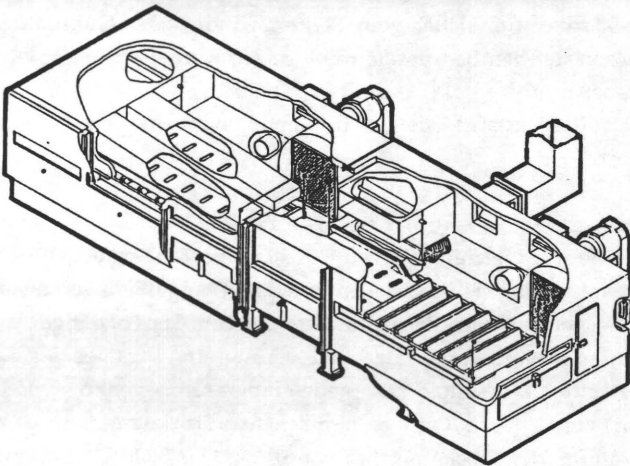


Bild 2.2: Prallstrahlschwebetrockner für das Rollenoffsetverfahren (mit freundlicher Genehmigung der Fa. GRACE TEC SYSTEMS, Maintal)

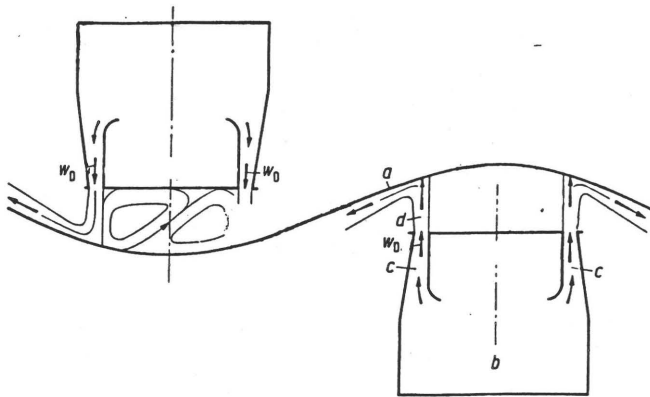


Bild 2.3: Prallstrahlschwebedüsen nach /2.1/

*a* Warenbahn, *b* Blaskasten, *c* Düse, *d* Luftstrahl

Temperaturzone) schnellere Erwärmung der Bahn und somit auch der Farbschicht wird die "effektive" Trockenstrecke verlängert und die Bahntemperatur am Trockneraustritt kann auf Werte um  $\vartheta_B = 110$  bis  $120^\circ\text{C}$  begrenzt werden. Trotz dieser Verfahrensverbesserungen wird ein Großteil des im Papier adsorptiv gebundenen Wassers ausgetrieben, wodurch Versprödung, Schrumpfung und insbesondere an zweiseitig stark bedruckten Flächen Wellen- und Blasenbildung im Druckprodukt auftreten.

Bei höheren Bahngeschwindigkeiten treten auch an den Kühlwalzen zunehmend trocknungsbedingte Probleme wie unzureichende Bahnabkühlung und Mineralölkondensatniederschlag auf, woraufhin sich Qualitätseinbußen durch Farbblegen und Wiederanlösen der Druckfarbe am Druckprodukt einstellen.

## 2.2 Ziele der Arbeit

Wie eine Gutachtenstatistik im Bereich "Problemfälle im Offsetdruck" zeigt (Bild 2.4) /2.2/, sind mehr als die Hälfte der Reklamationen auf Mängel bei der Druckfarbenverfestigung zurückzuführen. Allein ein Viertel aller Fälle betrifft dabei den Feuchteverlust des Papiers im Rollenoffsettrockner (Wellenbildung, Falzfestigkeit, Blasenbildung).

Mit abnehmender Papierrestfeuchte treten die Probleme insbesondere mit der Wellenbildung im Druckprodukt und Bahnabrissen bei der Weiterverarbeitung vermehrt auf, was inzwischen zum Einbau aufwendiger Nachbefeuchtungsanlagen zwischen Kühlwalzenständer und Falzapparat geführt hat. Die diesbezüglichen Zusammenhänge sind in /2.3/, /2.4/ und /2.5/ ausführlich besprochen.

Aus der geschilderten Problematik resultiert die Forderung, die am Trocknungsprozeß beteiligten Parameter so einzustellen, daß eine möglichst große Papierrestfeuchte bei gleichzeitig hoher Trocknungsgeschwindigkeit für die als Farbverdünnungsmittel zum Einsatz kommenden Mineralöle realisiert wird.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist deshalb die Entwicklung eines mathematischen Modells, das die Berechnung der Temperatur- und Wasserprofile in der Papierbahn in Abhängigkeit der zahlreichen Einflußgrößen zuläßt. Anhand der damit gewonnenen Resultate können Maßnahmen zur Optimierung aber auch die Grenzen des Trocknungsverfahrens aufgezeigt werden.

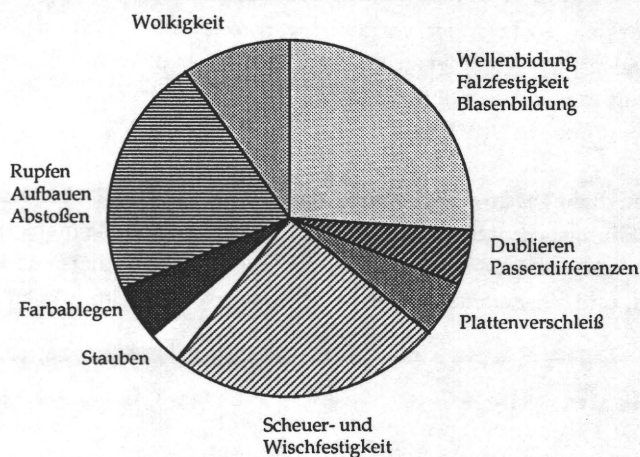


Bild 2.4: Gutachtenstatistik im Bereich "Problemfälle im Offsetdruck" /2.2/



### 3 Literaturübersicht

Grundlegende Untersuchungen mit einer Analyse der Papierfeuchtereduzierung bei der Druckfarbenverfestigung in Konvektionstrocknern wurden bisher nicht durchgeführt. Die Literatur zur Rollenoffsettrocknung beinhaltet deshalb überwiegend die in der Praxis auftretenden Probleme und gibt Hinweise zu Verfahrensverbesserungen.

Neben den bereits erwähnten Berichten (/2.3/, /2.4/ und /2.5/) werden im folgenden die wichtigsten Veröffentlichungen der letzten Jahre besprochen.

Bei einem eigens der Druckfarbentrocknung gewidmeten Symposium der "FOGRA" in München am 21. und 22. November 1990 bildete die Rollenoffset-Heatset-Trocknung einen umfangreichen Schwerpunkt. Zu nennen sind hier die Berichte /3.1/ bis /3.4/. Die Autoren beschreiben in ausführlicher Form die in Kap. 2 angesprochenen Probleme und weisen auf Optimierungsmaßnahmen sowie zukünftige Tendenzen hin.

Zudem wird eine Testmethode für den Trocknungsgrad von Rollenoffsetdruckprodukten vorgestellt /3.5/.

In /3.6/ sind die wesentlichen Aussagen der Berichte /2.3/ und /3.1/ bis /3.5/ übersichtlich und komprimiert zusammengefaßt.

Die Haupteinflüsse auf die Wellenbildung und die Papierversprödung bei der Rollenoffsettrocknung werden in einer umfangreichen experimentellen Untersuchung /3.7/ genannt. Es zeigt sich, daß steigende Trocknungstemperaturen und niedrige Papiergewichte die angesprochenen Probleme verstärken. Als Abhilfe wird vorgeschlagen, niedrigsiedende Verdünnungsmittel der Druckfarbe zu verwenden und die Farbschichtdicke zu verringern.

Inzwischen werden häufig aufwendige Wiederbefeuchtungsanlagen zwischen Kühlwalzenständer und Falzapparat installiert. Dabei wird Wasser in feinste Tröpfchen zerstäubt und mit Unterstützung eines elektrostatischen Feldes ins Papier transportiert /3.8/.

In /3.9/ wird das Trocknen mineralöhlhaltiger Druckfarbe mit Hilfe von Wasserdampf beschrieben. Bei Wasserdampftemperaturen von 110 bis 120 °C

verringert sich die Anfangsfeuchtebeladung des Papiers nur unwesentlich. Gegenüber der Heißlufttrocknung steigt die Trocknungsgeschwindigkeit des Farbverdünnungsmittels.

Über die Standardwerke zur Trocknung hinaus - zu nennen sind hier insbesondere die Bände 1 bis 3 der "Trocknungstechnik" /3.10/, /2.1/ und /3.11/ - wird in /3.12/ ein ausführlicher Überblick über die Konvektionstrocknung in der Druck- und Beschichtungstechnik gegeben: Neben dem herkömmlichen Verfahren mit Prallstrahlen (Bild 3.1 a), das beim Flexo- und Tiefdruck zum Einsatz kommt, werden Prallstrahlschwebe- und Überströmtrockner ausführlich behandelt. An Überströmdüsen wird die Warenbahn parallel vom Trocknungsmedium angeströmt (Bild 3.1 b). Die Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten sind unter vergleichbaren Trocknungsbedingungen kleiner als bei Prallstrahldüsen.

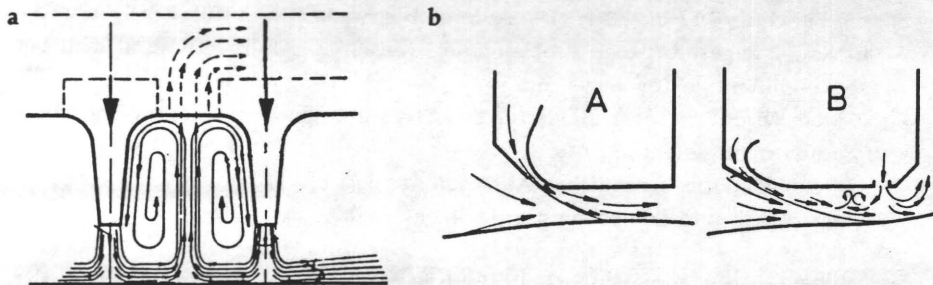


Bild 3.1: Prallstrahldüse (a) und zwei Bauformen von Überströmdüsen (b)  
(A ohne und B mit Hilfsprallstrahl )/3.12/

Weitere relevante Literatur wird im Laufe der nachfolgenden Herleitungen und Ausführungen genannt.

## 4 Modell der Transportvorgänge bei der Konvektionstrocknung

### 4.1 Physikalische Grundlagen

Die Papierfeuchtereduzierung bei der Heißluft-Konvektionstrocknung erweist sich als eine nichtisotherme Desorption.

Dabei laufen die folgenden Teilschritte gleichzeitig ab:

1. Wärme- und Stoffübergang in der Grenzschicht.
2. Stoff- und Energietransport in den Papierporen.
3. Wärmeleitung im Papier.
4. Desorption des Wassers durch Zufuhr der Sorptionswärme.

Zur mathematischen Beschreibung der Desorption werden die Stoff- und Energiebilanzgleichungen, die Gleichungen der Transportvorgänge und die Gleichung der Sorptionsisothermen benötigt.

Es werden zunächst die wichtigsten Grundlagen und Voraussetzungen näher erläutert.

#### 4.1.1 Struktur des Papiers

Wie eingangs erwähnt, ist Papier den porösen Festkörpern zuzuordnen. Gase und Dämpfe können durch die Poren sowohl hinein- als auch heraustransportiert werden (Bild 4.1). Häufig werden Papiere durch einen beidseitigen Strichauftrag veredelt, um die Oberfläche zu glätten und den Glanz zu steigern. Schwankungen der Papierdicke werden durch den sog. Strich von 5 bis 10  $\mu\text{m}$  auf 1 bis 2  $\mu\text{m}$  reduziert (siehe dazu auch Bilder 5.1 und 5.2, Papierschnitte).

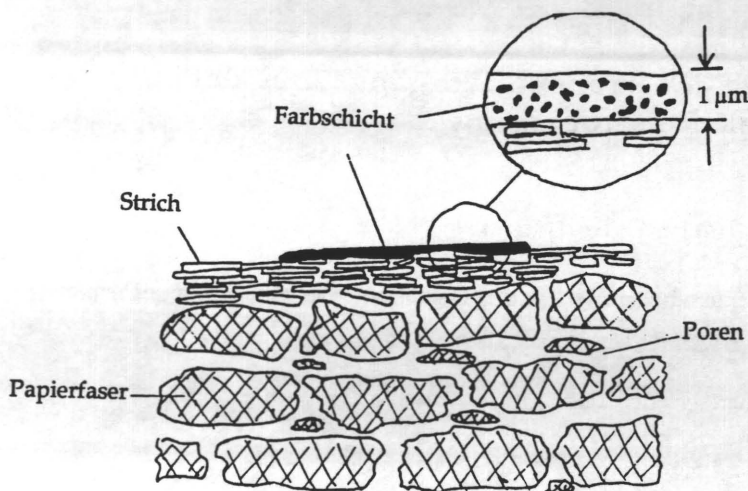


Bild 4.1: Schematische Darstellung der Papierstruktur /4.1/

#### 4.1.2 Bindung des Wassers an das Papier

Papier ist ein hygroskopischer Stoff, in dem sich in Abhängigkeit von der Temperatur und des Wasserdampfdruckes bzw. der relativen Feuchtigkeit der Luft eine Beladung mit Wasser einstellt. Das Wasser wird durch molekulare Kräfte, die sog. VAN DER WAALSchen Kräfte, adsorptiv gebunden.

Je nach Sorte enthält Papier unter normalen Umgebungsbedingungen wie z. B. bei einer Temperatur von  $\vartheta = 20\ ^\circ\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchte von  $\varphi = 50$  bis  $60\ \%$  Feuchtebeladungen von  $X = 4$  bis  $8\ \%$  ( $X = \text{Masse des gebundenen Wassers} / \text{Masse des trockenen Papiers}$ ).

Wird ein Papier einem anderen Umgebungszustand ausgesetzt, so geht solange Wasserdampf und Wärme vom Papier zur Luft oder umgekehrt über, bis ein neuer sog. Gleichgewichtszustand bezüglich Feuchtebeladung, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit erreicht ist.

Die Gleichgewichte zwischen den genannten Größen werden in Sorptionsisothermen dargestellt (Bild 4.2). Diese Sorptionsisothermen nehmen für jedes Papier einen eigenen Verlauf, jedoch ist deren Form bei allen Papieren ähnlich.

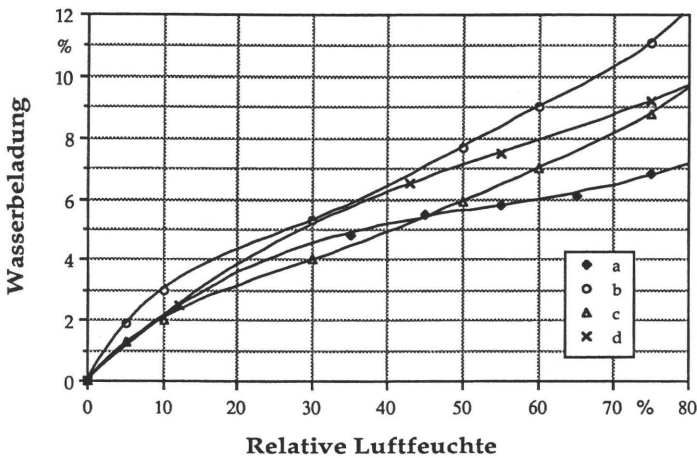


Bild 4.2: Sorptionsisothermen für Wasserdampf an gestrichenem Papier (a:  $m_B = 90 \text{ g/m}^2$ ,  $\vartheta = 23^\circ\text{C}$  nach /4.2/; c:  $m_B = 82 \text{ g/m}^2$ ,  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$  nach /3.9/) und Naturpapier (b:  $m_B = 61 \text{ g/m}^2$ ,  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$  nach /3.9/; d:  $m_B = 80 \text{ g/m}^2$ ,  $\vartheta = 40^\circ\text{C}$  nach /2.6/)

#### 4.1.3 Transport des Wassers im Papier

Stofftransport kann in der sorbierten wie auch in der Gasphase erfolgen. Stofftransport in der sorbierten Phase tritt nur bei multimolekularer Belegung der inneren Oberfläche des Sorbens auf /4.3/. Die Feuchtebeladung am Trocknungsbeginn des hier betrachteten Sorbens Papiers liegt in der Regel im Bereich der monomolekularen Belegung (siehe auch Kap. 4.4), so daß der Transport in der sorbierten Phase vernachlässigt wird.

Der Gesamtdruck im Papier entspricht während der Trocknung dem Umgebungsdruck, so daß hier keine Druckströmung auftritt. Entscheidend für die Art des Stofftransports sind die mittlere freie Weglänge  $\lambda$  des Adsorptivs (= adsorbierbare Komponente in der Gasphase) und der mittlere Poren-

durchmesser  $d$  des Adsorbens (= adsorbierender Feststoff), deren Quotient als KNUDSENZAHL  $Kn$  bezeichnet wird.

Nach /4.4/, S. 204 liegt Gasdiffusion vor, wenn  $Kn = \Lambda/d \ll 1$  ist. Ist  $Kn > 1$ , so bestimmt die Molekularbewegung nach KNUDSEN den Massenstrom. Im Bereich  $0,01 < Kn < 1$  überlagern sich beide Mechanismen.

Die mittlere freie Weglänge der Wassermoleküle ist nach /4.3/, S. 73 gegeben durch:

$$\Lambda = \Lambda_0 \frac{p_0}{p} \frac{T}{T_0} \quad (4.1)$$

(mit  $\Lambda_0 = 39,5 \cdot 10^{-9}$  m bei  $p_0 = 1$  bar und  $T_0 = 298$  K)

Im relevanten Temperaturbereich von  $\vartheta = 25$  bis  $150^\circ\text{C}$  und  $p = 1$  bar ergibt sich  $\Lambda = 4 \cdot 10^{-8}$  bis  $6 \cdot 10^{-8}$  m. Der durchschnittliche Porendurchmesser  $d$  von Druckpapieren bewegt sich nach /4.5/ zwischen  $d = 5 \cdot 10^{-6}$  und  $2 \cdot 10^{-8}$  m. Die KNUDSENZAHLEN liegen im Bereich von  $0,008 < Kn < 3$ .

Folglich wird hier im Regelfall eine Überlagerung der beiden Stofftransportmechanismen Gasdiffusion und Molekularbewegung infolge Partialdichte- bzw. Partialdruckunterschieden auftreten. Diese Überlagerung wird im äquivalenten Diffusionskoeffizienten (Kap. 4.5) berücksichtigt.

## 4.2 Erhaltungsgleichungen

### 4.2.1 Stofferhaltungsgleichung

Die Herleitung der Bilanzgleichungen erfolgt über eine Betrachtung der Massen- und Energieströme an einem Volumenelement des porösen Feststoffes Papier (Bild 4.3). Es wird angenommen, daß sich im Kontrollvolumen in vernachlässigbar kurzer Zeit Gleichgewicht gemäß der Sorptionsisothermen zwischen Feuchtebeladung  $X$  bzw. Partialdichte der Adsorbatphase  $\rho_{a,W}$ , Wasserdampfpartialdruck  $p_{WD}$  und Temperatur  $T$  einstellt (/4.3/, S. 87 f).

Der Stofferhaltungssatz in allgemeiner Form lautet:

$$\dot{S} = \dot{Z} - \dot{A} \pm \dot{R} \quad (4.2)$$

- $\dot{S}$  – Speicherung von Komponente i im Volumenelement pro Zeit  
 $\dot{Z}$  – Zustrom von i über die Oberfläche  
 $\dot{A}$  – Abstrom von i über die Oberfläche  
 $\dot{R}$  – Produktionsterm von i  
 Negatives Vorzeichen: Verbrauch von i  
 Positives Vorzeichen: Bildung von i

Für die Änderung der Masse einer Komponente i im Kontrollvolumen  $V_B$  mit der Oberfläche  $S_B$  gilt:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_B} \rho_{iges} dV_B = - \int_{S_B} \dot{m}_i \cdot n dS_B + \int_{V_B} \dot{r}_i dV_B \quad (4.3)$$

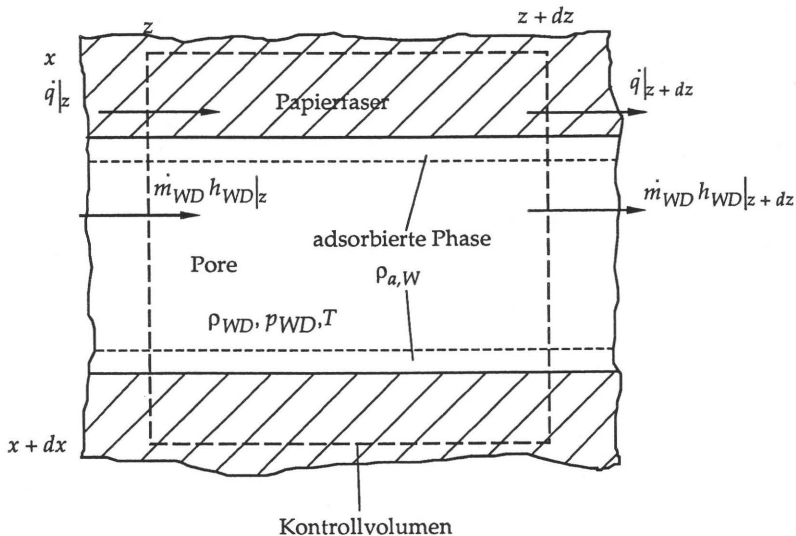


Bild 4.3: Kontrollvolumen für die Energie- und Stoffbilanz im Papier

$\rho_{iges}$	-	Gesamtdichte einer Komponente i	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\dot{m}_i$	-	Massenstromvektor einer Komponente i	[kg/m <sup>2</sup> s]
$n$	-	Normalenvektor	
$\dot{r}_i$	-	Bildungsrate einer Komponente i	[kg/m <sup>3</sup> s]

Mit Hilfe des GAUSSschen Integralsatzes wird das Oberflächenintegral aus Gl. (4.3) in ein Volumenintegral überführt:

$$\int \int_{V_B} \int \left[ \frac{\partial \rho_{iges}}{\partial t} + \nabla \cdot \dot{m}_i - \dot{r}_i \right] dV_B = 0 \quad (4.4)$$

Daraus folgt:

$$\frac{\partial \rho_{iges}}{\partial t} + \nabla \cdot \dot{m}_i - \dot{r}_i = 0 \quad (4.5)$$

oder

$$\frac{\partial \rho_{iges}}{\partial t} = -\nabla \cdot \dot{m}_i + \dot{r}_i \quad (4.6)$$

Zunächst wird die linke Seite der Gl. (4.6) weiter ausformuliert.

Für die Partialdichte  $\rho_{iges}$  einer adsorbierbaren Komponente i in einem porösen Festkörper gilt (bezogen auf das Gesamtvolumen):

$$\rho_{iges} = \varepsilon \rho_i + \rho_{a,i} \quad (4.7)$$

$\varepsilon$	-	Porosität des Festkörpers (= Porenvolumen/Gesamtvolumen)	
$\rho_i$	-	Partialdichte in der Gasphase im Porenvolumen	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{a,i}$	-	Partialdichte des adsorbierten Anteils bezogen auf das Gesamtvolumen im porösen Festkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]



Die Zeitableitung der Gl. (4.7) lautet demnach:

$$\frac{\partial \rho_{iges}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{a,i}}{\partial t} \quad (4.8)$$

Für eine nichtadsorbierbare Komponente j folgt daraus unmittelbar:

$$\frac{\partial \rho_{iges}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial \rho_j}{\partial t} = -\nabla \cdot \dot{m}_j + \dot{r}_j \quad (4.9)$$

Für das weitere Ausformulieren der Gleichungen werden zunächst einige wichtige Voraussetzungen genannt:

1. Im Papier findet keine chemische Reaktion statt, d. h. es tritt weder Produktion noch Verbrauch einer Komponente auf, so daß alle  $\dot{r}_j = 0$ .
2. Es wird mit einseitiger Diffusion gerechnet. Dabei diffundiert aufgrund von Partialdichteunterschieden Luft entgegen dem Dampf. Da die Luft nicht durch die Flüssigkeitsoberfläche wandern kann, überlagert sich der Diffusion eine Ausgleichsströmung. Der resultierende Luftmassenstrom aus Diffusion und Ausgleichsströmung ist  $\dot{m}_L = 0$ .

#### 4.2.1.1 Gleichung des Stofftransports

Die Massenstromdichte für den Stofftransport einer Komponente i in einem Gemisch von n Komponenten infolge von Partialdichteunterschieden ist unter Berücksichtigung der einseitigen Diffusion gegeben durch (siehe /4.4/ oder /4.6/):

$$\dot{m}_i = -D_{iM} \rho \nabla w_i + w_i \left( \sum_{k=1}^n \dot{m}_k \right) \quad (4.10)$$

$D_{iM}$	- Diffusionskoeffizient einer Komponente i im Mehrkomponentengemisch	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	- Gesamtdichte der Gase und Dämpfe	[kg/m <sup>3</sup> ]
$w_i$	- Massenanteil der Komponente i (= $\rho_i/\rho$ )	

Weiteres Ausformulieren der Gl. (4.10) liefert:

$$\dot{m}_i = -D_{iM} \rho \nabla w_i + w_i \left( \dot{m}_i + \sum_{k=1}^n (1 - \delta_{ik}) \dot{m}_k \right) \quad (4.11)$$

Umformen von Gl. (4.11) und Auflösen nach der Massenstromdichte  $\dot{m}_i$  der gesuchten Komponente ergibt:

$$\dot{m}_i = \frac{-D_{iM} \rho \nabla w_i + w_i \sum_{k=1}^n (1 - \delta_{ik}) \dot{m}_k}{1 - w_i} \quad (4.12)$$

Für den Massenstrom einer Komponente  $i$  in einem Gemisch zweier Komponenten  $i$  und  $j$  gilt dann:

$$\dot{m}_i = \frac{-D_{ij} \rho \nabla w_i + w_i \dot{m}_i}{1 - w_i} \quad (4.13)$$

Weiteres Ausformulieren von Gl. (4.13) mit  $\dot{m}_j = \dot{m}_L = 0$  liefert den Massenstrom für die Komponente  $i$  - im vorliegenden Fall der Wasserdampf mit dem Index WD.

$$\dot{m}_{WD} = -D_{WL} \rho \frac{\nabla w_{WD}}{1 - w_{WD}} = -D_{WL} \rho \frac{\nabla(\rho_{WD}/\rho)}{1 - \rho_{WD}/\rho} \quad (4.14)$$

Wasserdampf und Luft verhalten sich wie ideale Gase. Dafür gelten die in den Gleichungen (4.15) bis (4.19) dargestellten Zusammenhänge.

Gesamtdichte  $\rho$  und Partialdichte  $\rho_i$  der Gase und Dämpfe :

$$\rho = \frac{p}{R} \frac{M}{T} \quad \text{bzw.} \quad \rho_i = \frac{p_i}{R} \frac{M_i}{T} \quad (4.15)$$

Zusammenhang zwischen Massenanteil  $w_{WD}$  und Molanteil  $y_{WD}$  des Wasserdampfes:

$$w_{WD} = \frac{M_W}{M} y_{WD} \quad (4.16)$$

$$\nabla w_{WD} = \frac{M_W M_L}{M^2} \nabla y_{WD} \quad (4.17)$$

Molanteil des Wasserdampfes  $y_{WD}$ :

$$y_{WD} = \frac{p_{WD}}{p} \quad (4.18)$$

Gesamtmolmasse  $M$ :

$$M = y_{WD} M_W + y_L M_L = y_{WD} M_W + (1 - y_{WD}) M_L \quad (4.19)$$

Einsetzen der Gleichungen (4.15) bis (4.19) in Gl. (4.14) ergibt:

$$\dot{m}_i = -D_{WL} \frac{p}{R T} \frac{\nabla p_{WD}}{p - p_{WD}} \quad (4.20)$$

Zusammenfassen der Gleichungen (4.6), (4.8), (4.15) und (4.20) liefert unter der genannten Voraussetzung, daß weder Produktion noch Verbrauch einer Komponente auftreten ( $\dot{r}_i = 0$ ):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{Wges}}{\partial t} &= \varepsilon \frac{M_W}{R T^2} \left( T \frac{\partial p_{WD}}{\partial t} - p_{WD} \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial t} = \\ &= -\nabla \cdot \dot{m}_{WD} = \nabla \cdot \left( D_{WL} \frac{p}{R T} \frac{\nabla p_{WD}}{p - p_{WD}} \right) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Zum weiteren Ausdifferenzieren der Gl. (4.21) sind die Gleichungen der darin enthaltenen Größen zu bestimmen.

Die linke Seite der Gleichung (4.21) enthält die Zeitableitung der Partialdichte des Adsorbats  $\partial \rho_{a,W} / \partial t$ . Im Gleichgewichtsfall ist diese Partialdichte des adsorbierten Wassers eine Funktion der Temperatur und des Partialdruckes des Wasserdampfes  $\rho_{a,W} = \rho_{a,W}(p_{WD}, T)$  (siehe Kap. 4.4). Für  $\partial \rho_{a,W} / \partial t$  folgt damit:

$$\frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial t} = \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial p_{WD}} \frac{\partial p_{WD}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.22)$$

Der äquivalente Diffusionskoeffizient  $D_{WL}$  ist von der Temperatur und vom Gesamtdruck abhängig  $D_{WL} = D_{WL}(T, p)$  (vgl. Kap. 4.5). Für  $\nabla D_{WL}$  ergibt sich:

$$\nabla D_{WL} = \frac{\partial D_{WL}}{\partial T} \nabla T + \frac{\partial D_{WL}}{\partial p} \nabla p \quad (4.23)$$

Da der Gesamtdruck  $p = \text{konst.}$  ist, gilt  $\nabla p = 0$ .

Ausdifferenzieren der Gl. (4.21) und Einsetzen der Gl. (4.22) und (4.23) ergibt für die Stofferhaltungsgleichung des Wassers im Papier:

$$\left( \varepsilon \frac{M_W}{R T} + \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial p_{WD}} \right) \frac{\partial p_{WD}}{\partial t} + \left( \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial T} - \varepsilon \frac{M_W p_{WD}}{R T^2} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = D_{WL} \frac{p M_W}{R T} \frac{1}{p - p_{WD}} \cdot \left( \nabla^2 p_{WD} + \frac{1}{p - p_{WD}} (\nabla p_{WD})^2 + \left( \frac{1}{D_{WL}} \frac{\partial D_{WL}}{\partial T} - \frac{1}{T} \right) \nabla T \cdot \nabla p_{WD} \right) \quad (4.24)$$

#### 4.2.2 Energieerhaltungsgleichung

Analog zu der für die Stofferhaltung hergeleiteten Gl. (4.6) lautet die allgemeine Form des Energieerhaltungssatzes:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla \cdot \dot{e} + \dot{H}_r \quad (4.25)$$

Hierbei bedeuten:

- $H$  – Volumenbezogene Enthalpie innerhalb eines Kontrollvolumens [J/m<sup>3</sup>]
- $\dot{e}$  – Summe der Enthalpiestromvektoren über die Oberfläche des Kontrollvolumens [W/m<sup>2</sup>]
- $\dot{H}_r$  – Änderung der volumenbezogenen Enthalpie infolge chemischer Reaktion [W/m<sup>3</sup>]

Zunächst wird die linke Seite der Gl. (4.25) weiter ausformuliert.

Die volumenbezogene Enthalpie  $H$  im Kontrollvolumen setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen:

$$H = \rho_S h_S + \varepsilon \sum_i \rho_i h_i + \varepsilon \sum_j \rho_j h_j + \sum_i \rho_{a,i} h_{a,i} \quad (4.26)$$

$\rho_S$  – Dichte des unbeladenen (trockenen) Sorbens [kg/m<sup>3</sup>]

Die spezifischen Enthalpien der beteiligten Komponenten mit der Einheit [J/kg] werden auf  $\vartheta = 0^\circ\text{C}$  bzw.  $T_0 = 273,15\text{ K}$  bezogen. In Gl. (4.26) bedeuten:

Spez. Enthalpie des Sorbens  $h_S$

$$h_S = c_{p,S} (T - T_0) \quad (4.27)$$

Spez. Enthalpie der adsorbierbaren Komponente  $i$  in der Dampfphase  $h_i$

$$h_i = h_{V,i0} + c_{p,i} (T - T_0) \quad (4.28)$$

Spez. Enthalpie der inerten Komponente  $j$   $h_j$

$$h_j = c_{p,j} (T - T_0) \quad (4.29)$$

Spez. Enthalpie der freien flüssigen Phase der adsorbierbaren Komponente  $i$  in der Sorbatphase  $h_{a,i}$

$$h_{a,i} = h_i + h_{ad,i} \quad (4.30)$$

Spez. Sorptionswärme  $h_{ad,i}$  zusammengesetzt aus Verdampfungsenthalpie  $h_{V,i}$  und der beladungsabhängigen Bindungsenthalpie  $h_{B,i}(X_i)$

$$h_{ad,i} = -h_{V,i} - h_{B,i}(X_i) \quad (4.31)$$

Die Bindungsenthalpie nimmt mit zunehmender Beladung des Sorbens ab. Dies rührt daher, daß mit zunehmender Bedeckung der inneren Oberfläche des

Sorbens eine größere Anzahl von Molekülen des Adsorbats diese Oberfläche verlassen können.

Im folgenden wird jedoch mit einem Mittelwert der Bindungsenthalpie  $h_{B,i}$  über dem Arbeitsbereich der Feuchteänderung gerechnet. Dies ist zulässig, da die Bindungsenthalpie im Vergleich zur Verdampfungsenthalpie  $h_{V,i}$  klein ist, und die Sorptionswärme  $h_{ad,i}$  nur anteilig in die Energieerhaltungsgleichung eingeht.

Die spez. Verdampfungsenthalpie bei der Temperatur  $T$  ist gegeben durch:

$$h_{V,i} = h_{V,i0} - (c_{pa,i} - c_{p,i}) (T - T_0) \quad (4.32)$$

Für die zeitlichen Ableitungen der einzelnen Anteile aus Gl. (4.26) gilt:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_S h_S) = \rho_S c_{p,S} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \varepsilon \sum_i \rho_i h_i \right) = \varepsilon \left( \sum_i h_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \sum_i \rho_i \frac{\partial h_i}{\partial t} \right) \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \varepsilon \sum_j \rho_j h_j \right) = \varepsilon \left( \sum_j h_j \frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \sum_j \rho_j \frac{\partial h_j}{\partial t} \right) \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_i \rho_{a,i} h_{a,i} \right) = \sum_i h_{a,i} \frac{\partial \rho_{a,i}}{\partial t} + \sum_i \rho_{a,i} \frac{\partial h_{a,i}}{\partial t} \quad (4.36)$$

Die zeitliche Ableitung der spezifischen Enthalpie der sorbierten Phase  $h_{a,i}$  wird zu:

$$\frac{\partial h_{a,i}}{\partial t} = \frac{\partial h_{a,i}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial h_{a,i}}{\partial \rho_{a,i}} \frac{\partial \rho_{a,i}}{\partial t} \quad (4.37)$$

Der zweite Term auf der rechten Seite der Gl. (4.37) ist gleich null, da  $h_{B,i}$  und

somit  $h_{a,i}$  wie oben vorausgesetzt nicht von der Beladung  $X$  bzw. der Partialdichte  $\rho_{a,i}$  abhängen sollen. Unter Berücksichtigung von Gl. (4.31) ergibt sich:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_i \rho_{a,i} h_{a,i} \right) = \sum_i \rho_{a,i} c_{pa,i} \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_i (h_i + h_{ad,i}) \frac{\partial \rho_{a,i}}{\partial t} \quad (4.38)$$

Zusammenfassen der Gleichungen (4.32) bis (4.38) liefert die zeitliche Änderung der spez. Enthalpie im Kontrollvolumen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_{ges}}{\partial t} = & \rho_S c_{p,S} \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \sum_i h_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \varepsilon \sum_i \rho_i c_{p,i} \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \sum_j h_j \frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \\ & + \varepsilon \sum_j \rho_j c_{p,j} \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_i \rho_{a,i} c_{pa,i} \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_i (h_{ad,i} + h_i) \frac{\partial \rho_{a,i}}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.39)$$

Sortieren nach den zeitlichen Ableitungen der Partialdichten und Temperaturen ergibt den gesuchten Zusammenhang für die linke Seite der Energieerhaltungsgleichung:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_{ges}}{\partial t} = & \sum_i h_i \left( \varepsilon \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{a,i}}{\partial t} \right) + \varepsilon \sum_j h_j \frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \sum_i h_{ad,i} \frac{\partial \rho_{a,i}}{\partial t} + \\ & + \left( \rho_S c_{p,S} + \varepsilon \sum_i \rho_i c_{p,i} + \varepsilon \sum_j \rho_j c_{p,j} + \sum_i \rho_{a,i} c_{pa,i} \right) \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Die rechte Seite der Gl. (4.25) enthält den Enthalpiestrom und den Produktions-term, der hier gleich Null ist. Die zeitliche Änderung der Enthalpie im Kontrollvolumen wird also nur durch den Energiestrom  $\dot{e}$  hervorgerufen, der sich aus Wärmeleitung und Wärmemitführung infolge Stofftransport zusammensetzt:

$$\dot{e} = \dot{q} + \sum_i \dot{m}_i h_i + \sum_j \dot{m}_j h_j = -\lambda_S \nabla T + \sum_i \dot{m}_i h_i + \sum_j \dot{m}_j h_j \quad (4.41)$$

Hierbei bedeuten:

$\lambda_S$  – Wärmeleitkoeffizient des Sorbens [W/m K]

$\dot{q} = -\lambda_S \nabla T$  – Energiestrom infolge Wärmeleitung [W/m<sup>2</sup>]

$\sum_i \dot{m}_i h_i$  – Energiestrom durch die Massenströme der desorbierbaren Komponenten i [W/m<sup>2</sup>]

$\sum_j \dot{m}_j h_j$  – Energiestrom durch die Massenströme der inerten Komponenten j [W/m<sup>2</sup>]

Die Ableitung nach dem Ort ergibt:

$$\nabla \cdot \dot{e} = -\lambda_S \nabla^2 T + \sum_i \nabla \cdot \dot{m}_i h_i + \sum_i \dot{m}_i \cdot \nabla h_i + \sum_j \nabla \cdot \dot{m}_j h_j + \sum_j \dot{m}_j \cdot \nabla h_j \quad (4.42)$$

Zusammenfassen der Gleichungen (4.40) und (4.42) liefert:

$$\begin{aligned} & \sum_i h_i \left( \varepsilon \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{a,i}}{\partial t} \right) + \varepsilon \sum_j h_j \frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \sum_i h_{ad,i} \frac{\partial \rho_{a,i}}{\partial t} + \\ & + \left( \rho_S c_{p,S} + \varepsilon \sum_i \rho_i c_{p,i} + \varepsilon \sum_j \rho_j c_{p,j} + \sum_i \rho_{a,i} c_{p,a,i} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & = \lambda_S \nabla^2 T - \sum_i \nabla \cdot \dot{m}_i h_i - \sum_i \dot{m}_i \cdot \nabla h_i - \sum_j \nabla \cdot \dot{m}_j h_j - \sum_j \dot{m}_j \cdot \nabla h_j \quad (4.43) \end{aligned}$$

Einsetzen der Gleichungen (4.9) und (4.21) ergibt:



$$\begin{aligned}
 \sum_i h_{ad,i} \frac{\partial \rho_{a,i}}{\partial t} + \left( \rho_S c_{p,S} + \varepsilon \sum_i \rho_i c_{p,i} + \varepsilon \sum_j \rho_j c_{p,j} + \sum_i \rho_{a,i} c_{pa,i} \right) \frac{\partial T}{\partial t} &= \\
 = \lambda_S \nabla^2 T - \sum_i \dot{m}_i \cdot \nabla h_i - \sum_j \dot{m}_j \cdot \nabla h_j &\quad (4.44)
 \end{aligned}$$

Für die weiteren Ausführungen gelten folgende Annahmen bzw. Voraussetzungen:

1. Es wird nur eine Komponente - das Wasser (Index  $W$  für die Sorbatphase, Index  $WD$  für die Dampfphase) - desorbiert.
2. Wie bereits in Kap. 4.2.1 beschrieben, ist  $\dot{m}_j = \dot{m}_L = 0$ .
3. Die in der linken Seite der Energieerhaltungsgleichung enthaltenen Terme der Gasphasen sind im Vergleich zu den restlichen Gliedern sehr klein und werden vernachlässigt.
4. Als Sorbens tritt hier der Bedruckstoff (Index  $B$ ) auf.

Damit und unter Berücksichtigung der Gl. (4.20) folgt für die Energieerhaltungsgleichung:

$$\begin{aligned}
 h_{ad,W} \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial t} + (\rho_B c_{p,B} + \rho_{a,W} c_{pa,W}) \frac{\partial T}{\partial t} &= \\
 = \lambda_B \nabla^2 T - \dot{m}_{WD} \cdot \nabla h_{WD} & \\
 = \lambda_B \nabla^2 T + D_{WL} \frac{p}{R T} \frac{V p_{WD}}{p - p_{WD}} \cdot \nabla h_{WD} &\quad (4.45)
 \end{aligned}$$

Die Ortsableitung der temperaturabhängigen spez. Enthalpie des Wasserdampfes  $\nabla h_{WD}$  ergibt sich mit Gl. (4.28) zu:

$$\nabla h_{WD} = \frac{\partial h_{WD}}{\partial T} \nabla T = c_{p,WD} \nabla T \quad (4.46)$$

Einsetzen der Gleichungen (4.46) und (4.22) liefert für die Energieerhaltungsgleichung:

$$\begin{aligned}
 h_{ad,W} \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial p_{WD}} \frac{\partial p_{WD}}{\partial t} + \left( \rho_B c_{p,B} + \rho_{a,W} c_{pa,W} + h_{ad,W} \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \\
 = \lambda_B \nabla^2 T + D_{WL} \frac{p}{R T} \frac{M_W}{p - p_{WD}} \frac{c_{p,WD}}{p - p_{WD}} \nabla T \cdot \nabla p_{WD}
 \end{aligned} \quad (4.47)$$

### 4.3 Zeitableitungen der Temperatur und des Wasserdampfpartialdruckes

Die Erhaltungsgleichungen (4.24) und (4.47) gelten für beliebige Raumrichtungen. Für eine Bedruckstoffbahn ist es sinnvoll, ein kartesisches Koordinatensystem zu wählen, wobei der Bahnlaufrichtung die  $x$ -Koordinate, der Breitenrichtung die  $y$ -Koordinate und der Dickenrichtung die  $z$ -Koordinate zugeordnet werden.

Wärme- und Stofftransport in Lauf- und Breitenrichtung der Bahn und somit die Ausbildung von Partialdruck- und Temperaturgradienten werden gegenüber der Dickenrichtung als vernachlässigbar klein angenommen. In den Erhaltungsgleichungen wird deshalb nur die  $z$ -Koordinate berücksichtigt.

**Stoffhaltungsgleichung:**

$$\begin{aligned}
 \left( \epsilon \frac{M_W}{R T} + \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial p_{WD}} \right) \frac{\partial p_{WD}}{\partial t} + \left( \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial T} - \epsilon \frac{M_W}{R T^2} p_{WD} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = D_{WL} \frac{p}{R T} \frac{M_W}{p - p_{WD}} \cdot \\
 \left( \frac{\partial^2 p_{WD}}{\partial z^2} + \frac{1}{p - p_{WD}} \left( \frac{\partial p_{WD}}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{1}{D_{WL}} \frac{\partial D_{WL}}{\partial T} - \frac{1}{T} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial p_{WD}}{\partial z} \right)
 \end{aligned} \quad (4.48)$$

**Energieerhaltungsgleichung:**

$$\begin{aligned}
 h_{ad,W} \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial p_{WD}} \frac{\partial p_{WD}}{\partial t} + \left( \rho_B c_{p,B} + \rho_{a,W} c_{pa,W} + h_{ad,W} \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \\
 = \lambda_B \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + D_{WL} \frac{p}{R T} \frac{M_W}{p - p_{WD}} \frac{c_{p,WD}}{p - p_{WD}} \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial p_{WD}}{\partial z}
 \end{aligned} \quad (4.49)$$

Beide Erhaltungsgleichungen enthalten Terme mit dem Produkt aus Ableitungen der Temperatur und des Partialdruckes (sog. gemischte Glieder). Vergleichsrechnungen mit und ohne diese Terme zeigen, daß deren Einfluß auf das Ergebnis vernachlässigbar klein ist.

Gleiches gilt für die Terme der Gasphase auf der linken Seite der Stofferhaltungsgleichung, die im Verhältnis zu den Ableitungen der Adsorbatphase sehr klein sind.

Für eine übersichtlichere Darstellung der Bilanzgleichungen werden die genannten Ausdrücke im folgenden nicht mehr berücksichtigt.

Zur numerischen Lösung des Differentialgleichungssystems ist die explizite Darstellungsform  $\partial p_{WD}/\partial t = f(z)$  und  $\partial T/\partial t = g(z)$  erforderlich.

Die Gleichungen (4.48) und (4.49) als Matrixmultiplikation in komprimierter Form dargestellt lauten:

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial p_{WD}}{\partial t} \\ \frac{\partial T}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \end{pmatrix} \quad (4.50)$$

Für die verschiedenen Matrixelemente ist folgendes einzusetzen:

$$A_{11} = \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial p_{WD}} \quad (4.51)$$

$$A_{12} = \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial T} \quad (4.52)$$

$$A_{21} = h_{ad,W} \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial p_{WD}} \quad (4.53)$$

$$A_{22} = \rho_B c_{p,B} + \rho_{a,W} c_{p,a,W} + h_{ad,W} \frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial T} \quad (4.54)$$

$$R_1 = D_{WL} \frac{p}{R T} \frac{1}{p - p_{WD}} \left( \frac{\partial^2 p_{WD}}{\partial z^2} + \frac{1}{p - p_{WD}} \left( \frac{\partial p_{WD}}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (4.55)$$

$$R_2 = \lambda_B \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4.56)$$

Aus Gl. (4.50) ergeben sich die gesuchten Zeitableitungen der Wasserdampfpartialdichte und der Temperatur:

$$\frac{\partial p_{WD}}{\partial t} = \frac{R_1}{A_{11}} \frac{A_{22}}{A_{22}} - \frac{R_2}{A_{21}} \frac{A_{12}}{A_{12}} \quad (4.57)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{R_2}{A_{11}} \frac{A_{11}}{A_{22}} - \frac{R_1}{A_{21}} \frac{A_{21}}{A_{12}} \quad (4.58)$$

## 4.4 Sorptionsgleichgewicht

Neben den Zeitableitungen des Wasserdampfpartialdruckes (Gl. (4.57)) und der Temperatur (Gl. (4.58)) wird eine weitere Gleichung benötigt, um die dritte gesuchte Größe - die Partialdichte der adsorbierten Phase  $\rho_{a,W}$  bzw. deren Beladung  $X$  (Gl. (4.60)) - zu berechnen. Diese sog. Gleichgewichtsbeziehung ist durch die Sorptionsisothermen gegeben. Für eine übersichtliche Darstellung der Isothermen wird in der Regel die Beladung  $X$  über der rel. Feuchte  $\phi$ , die als Quotient des Wasserdampfpartialdruckes  $p_{WD}$  und des Sättigungsdampfdruckes  $p_{WD}^*$  definiert ist (Gl. (4.62)), aufgetragen (vgl. Bild 4.2).

### 4.4.1 Gleichung der Sorptionsisothermen

Der Zusammenhang zwischen der Partialdichte  $\rho_{a,W}$  und der Beladung  $X$  ist gegeben durch:

$$\rho_{a,W} = X \rho_B \quad (4.59)$$

wobei  $\rho_B$  für die Dichte des trockenen Bedruckstoffes steht.

Bei Papier kann davon ausgegangen werden, daß unter normalen Umgebungs-

bedingungen ( $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ , rel. Luftfeuchte  $\varphi = 50$  bis  $60\%$ ) an der inneren Oberfläche höchstens monomolekulare Belegung adsorbierten Wassers vorliegt. Dies zeigt der Verlauf der Sorptionsisothermen, die in diesem Bereich eine geringe Steigung aufweist. Bewegt sich die rel. Feuchte im Bereich  $0 < \varphi < 60\%$ , wird das im Papier herrschende Gleichgewicht von Beladung, Temperatur und rel. Feuchte meist mit der LANGMUIR-Gleichung\*, die für einschichtige Belegung eines Adsorbens gilt (siehe /4.3/, S. 23 ff), beschrieben (vgl. /2.6/, S. 63 ff).

Beim heute noch überwiegend angewendeten "Naß-Offsetverfahren" werden nichtdruckende Flächen der Druckplatte mit Feuchtmittel gegen Einfärbung geschützt. Dadurch nimmt der Bedruckstoff zusätzliches Wasser auf, so daß zu Beginn der Trocknung die monomolekulare Beladung im Papier überschritten werden kann. Da die LANGMUIR-Gleichung lediglich bis zur einschichtigen Belegung gilt, wird hier die aufwendigere Gleichgewichtsbeziehung nach BRUNAUER, EMMET und TELLER (sog. BET-Gleichung) für mehrschichtige Adsorption verwendet. Die Sorptionsisothermen wurden für eine gute Übereinstimmung mit den Meßwerten (siehe Kap. 5.1.4) durch eine Adsorption in maximal drei Schichten angepaßt. Nach /4.3/, S. 29 wird dafür die Beladung  $X$  nach folgendem Zusammenhang berechnet:

$$X = X_{\text{mono}} \frac{b \varphi}{1 - \varphi} \frac{1 - 4 \varphi^3 + 3 \varphi^4}{1 + (b - 1) \varphi - b \varphi^4} \quad (4.60)$$

- $X_{\text{mono}}$  – Beladung bei vollständiger monomolekularer Belegung der inneren Oberfläche des Adsorbens  
 $b$  – Faktor der Sorptionsisothermen  
 $\varphi$  – Relative Feuchte

Der Faktor der Sorptionsisothermen  $b$  berechnet sich nach /4.3/, S. 23:

$$b = b_0 \exp \left( \frac{h_{B,W}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \quad (4.61)$$

- $h_{B,W}$  – Bindungsenergie [J/kmol]  
 $b_0$  – Sorptionsgleichgewichtskonstante

---

\* Gleichung nach LANGMUIR:  $X = X_{\text{mono}} \frac{b \varphi}{1 + b \varphi}$

Die relative Feuchte  $\varphi$  ist der Quotient aus dem Dampfdruck  $p_{WD}$  und dem temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck  $p_{WD}''$ .

$$\varphi = \frac{p_{WD}}{p_{WD}''} \quad (4.62)$$

Der Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes  $p_{WD}''$  ist nach /4.8/ temperaturabhängig gegeben durch:

$$p_{WD}'' = 10^{\left(-\frac{A}{T} + B + C \lg T\right)} \quad (4.63)$$

#### 4.4.2 Ableitung der Beladung nach dem Wasserdampfpartialdruck

In den Gleichungen (4.51) bis (4.54) sind die Ableitung der Partialdichte der Sorbathase nach dem Wasserdampfpartialdruck und die Ableitung nach der Temperatur enthalten.

Die Ableitung der Partialdichte des adsorbierten Wassers (Gl. (4.59)) nach dem Wasserdampfpartialdruck kann wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial p_{WD}} = \rho_B \frac{\partial X}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial p_{WD}} \quad (4.64)$$

- Ableitung der Beladung nach der relativen Feuchte

$$\frac{\partial X}{\partial \varphi} = X_{mono} \left( u \frac{\partial v}{\partial \varphi} + v \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) \quad (4.65)$$

mit

$$u = \frac{b \varphi}{1 - \varphi} \quad (4.66)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \varphi} = \frac{b}{(1 - \varphi)^2} \quad (4.67)$$

$$v = \frac{1 - 4\varphi^3 + 3\varphi^4}{1 + (b-1)\varphi - b\varphi^4} \quad (4.68)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \varphi} = \frac{-4b\varphi^6 + 9(b-1)\varphi^4 + (20-4b)\varphi^3 - 12\varphi^2 - b + 1}{(1 + (b-1)\varphi - b\varphi^4)^2} \quad (4.69)$$

- Ableitung der relativen Feuchte nach dem Wasserdampfdruck

$$\frac{\partial \varphi}{\partial p_{WD}} = \frac{\partial}{\partial p_{WD}} \left( \frac{p_{WD}}{p_{WD}''} \right) = \frac{1}{p_{WD}''} \quad (4.70)$$

#### 4.4.3 Ableitung der Beladung nach der Temperatur

In Gl. (4.60) hängen sowohl der Faktor  $b$  wie auch die relative Luftfeuchte  $\varphi$  von der Temperatur ab.

$$\frac{\partial \rho_{a,W}}{\partial T} = \rho_B \frac{\partial X}{\partial T} = \rho_B \left( \frac{\partial X}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial T} + \frac{\partial X}{\partial b} \frac{\partial b}{\partial T} \right) \quad (4.71)$$

Die Ableitung  $\partial X / \partial \varphi$  ist bereits in den Gleichungen (4.66) bis (4.69) dargestellt. Für die weiteren gesuchten Ableitungen gilt:

- Ableitung der relativen Feuchte nach der Temperatur

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{p_{WD}}{p_{WD}''} \right) = - \frac{p_{WD}}{p_{WD}''^2} \frac{\partial p_{WD}''}{\partial T} \quad (4.72)$$

$$\frac{\partial p_{WD}''}{\partial T} = \ln(10) \left( \frac{A}{T^2} + \frac{C}{T} \lg e \right) p_{WD}'' = \left( \ln(10) \frac{A}{T^2} + \frac{C}{T} \right) p_{WD}'' \quad (4.73)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = - \left( \ln(10) \frac{A}{T^2} + \frac{C}{T} \right) \frac{p_{WD}}{p_{WD}''} = - \left( \ln(10) \frac{A}{T^2} + \frac{C}{T} \right) \varphi \quad (4.74)$$

- Ableitung der Beladung nach dem Faktor der Sorptionsisothermen

$$\frac{\partial X}{\partial b} = X_{\text{mono}} \left( u \frac{\partial v}{\partial b} + v \frac{\partial u}{\partial b} \right) \quad (4.75)$$

mit

$$u = \frac{b \varphi}{1 - \varphi} \quad (4.76)$$

$$\frac{\partial u}{\partial b} = \frac{\varphi}{1 - \varphi} \quad (4.77)$$

$$v = \frac{1 - 4 \varphi^3 + 3 \varphi^4}{1 + (b-1) \varphi - b \varphi^4} \quad (4.78)$$

$$\frac{\partial v}{\partial b} = \frac{12 (\varphi^8 - \varphi^7) - 3 \varphi^5 + 5 \varphi^4 - \varphi}{(1 + (b-1) \varphi - b \varphi^4)^2} \quad (4.79)$$

- Ableitung des Faktors  $b$  nach der Temperatur

$$\frac{\partial b}{\partial T} = -b_0 \frac{h_{B,W}}{R T^2} \exp \left( \frac{h_{B,W}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) = - \frac{h_{B,W}}{R T^2} b \quad (4.80)$$

## 4.5 Äquivalenter Diffusionskoeffizient

Bei Überlagerung von Gasdiffusion und KNUDSENScher Molekularbewegung und konstantem Gesamtdruck  $p$  addieren sich nach /4.4/, S. 205 die Diffusionswiderstände, so daß sich folgender Zusammenhang für den äquivalenten Diffusionskoeffizienten innerhalb des Papiers ergibt:



$$D_{WL} = \frac{1}{\frac{1}{D_{D,WL}} + \frac{1}{D_{Kn}}} \quad (4.81)$$

In Gl. (4.81) sind die sog. äquivalenten Diffusionskoeffizienten einzusetzen, die die Diffusionswiderstandsfaktoren im porösen Feststoff mitberücksichtigen.

#### 4.5.1 Binärer und äquivalenter Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion

Der äquivalente Diffusionskoeffizient  $D_{D,WL}$  für die Gasdiffusion in porösen Feststoffen lautet:

$$D_{D,WL} = \frac{D_{WL}'}{\mu} \quad (4.82)$$

mit

$$\mu = \frac{\mu_{B,D}}{\epsilon} \quad (4.83)$$

- $D_{WL}'$  – Binärer Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion Wasser-Luft [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $\mu$  – Diffusionswiderstandsfaktor im Papier
- $\mu_{B,D}$  – Weg- bzw. Tortuositätsfaktor des Bedruckstoffes für Gasdiffusion
- $\epsilon$  – Porosität des Bedruckstoffes

In /4.7/, S. Da 33 wird eine empirische Gleichung zur Berechnung des binären Diffusionskoeffizienten angegeben\*:

$$D_{WL}' = \frac{1,013 \cdot T^{1,75} \left( \frac{M_W + M_L}{M_W \cdot M_L} \right)^{1/2} \cdot 10^{-2}}{p \left( (\Sigma v_{DW})^{1/3} + (\Sigma v_{DL})^{1/3} \right)^2} \quad (4.84)$$

---

\* Die sonst für den Diffusionskoeffizient von Wasserdampf und Luft verwendete Gleichung nach SCHIRMER ( $D_{WL} = 2,26 (T/273 \text{ K})^{1,81} p^{-1}$ ) wird hier nicht angewendet, da ihre Gültigkeit auf den Temperaturbereich zwischen  $\vartheta = 20$  und  $90^\circ \text{C}$  beschränkt ist (/3.10/, S. 178).

Der Diffusionskoeffizient nach Gl. (4.84) besitzt die Einheit  $[m^2/s]$ , während die in /4.7/ enthaltene Gleichung  $[cm^2/s]$  liefert.

Die konstanten Anteile aus Gl. (4.84), denen auch die Molmassen  $M_L$  und  $M_W$  und die sog. Diffusionsvolumina  $v_{DL}$  und  $v_{DW}$  zuzuordnen sind, werden im folgenden im Faktor  $k_{D,WL}$  zusammengefaßt. Einsetzen der Gleichungen (4.83) und (4.84) in (4.82) ergibt für den äquivalenten Diffusionskoeffizienten  $D_{D,WL}$ :

$$D_{D,WL} = k_{D,WL} \frac{\varepsilon}{\mu_{B,D}} \frac{T^{1,75}}{p} \quad (4.85)$$

#### 4.5.2 Äquivalenter Diffusionskoeffizient für KNUDSENSche Molekularbewegung

Für den Diffusionskoeffizienten der KNUDSENSchen Molekularbewegung gilt nach /4.4/, S. 205:

$$D_{Kn}' = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{R T}{2 \pi M_W}} d = 8,574 d T^{0,5} \quad (4.86)$$

$d$  - Mittlerer Porendurchmesser  $[m]$

Der äquivalente Diffusionskoeffizient ist gegeben durch:

$$D_{Kn} = \frac{\varepsilon}{\mu_{B,Kn}} D_{Kn}' \quad (4.87)$$

Hier wird nach /4.3/, S. 76 vereinfachend  $\mu_{B,Kn} = (\mu_{B,D})^{1,75}$  angenommen.

## 4.6 Numerische Lösung der Differentialgleichungen

Die Gleichungen (4.57) und (4.58) sind partielle parabolische Differentialgleichungen mit nichtlinearen Koeffizienten und ersten Ableitungen hinsichtlich der Zeit und ersten und zweiten Ableitungen hinsichtlich des Ortes. Zur numerischen

Lösung werden diese Gleichungen diskretisiert, wofür die Ableitungen nach der Ortskoordinate  $z$  mit dem Verfahren der finiten Differenzen gebildet werden. Damit werden die partiellen Differentialgleichungen in gewöhnliche Differentialgleichungen erster Ordnung der Zeit überführt.

Für das vorliegende Problem werden auf die Bahn  $N + 2$  Stützstellen gelegt. Die Stellen 1 und  $N + 2$  liegen dabei auf dem Papierrand (Bild 4.4).

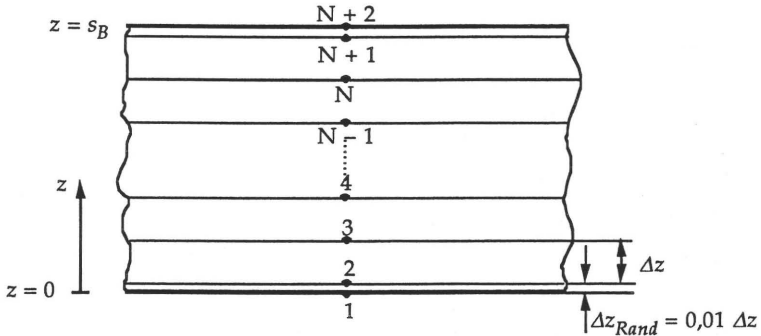


Bild 4.4: Stützstellen im Papier

Im Inneren des Papiers befinden sich  $N$  Stützstellen (Stellen 2 bis  $N + 1$ ) mit  $N - 1$  äquidistanten Intervallen der Länge  $\Delta z = s_B / (N - 1 + 0,02)$ . Die beiden Randschichten (gebildet aus den Stützstellen 1 und 2 und aus  $N + 1$  und  $N + 2$ ) besitzen lediglich eine Dicke von  $0,01 \Delta z$ , wodurch sich die numerische Berechnung vereinfacht (siehe Kap. 4.7.2).

Das Verfahren der finiten Differenzen kommt für die Gleichungen (4.57) und (4.58) sowie für die Randbedingungen (vgl. Gleichungen (4.111), (4.112)) zur Anwendung.

Für die innerhalb des Papiers liegenden Stützstellen (2 bis  $N + 1$ ) lautet die allgemeine Form für die erste und zweite Ableitung der Funktion  $F$  nach der Ortskoordinate  $z$  in der Schreibweise der finiten Differenzen

$$\frac{\partial F}{\partial z} = \frac{F_{i+1} - F_{i-1}}{2 \Delta z} \quad (4.88)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = \frac{F_{i+1} - 2F_i + F_{i-1}}{\Delta z^2} \quad (4.89)$$

Bei der Formulierung der Randbedingungen treten erste Ableitungen nach den Ortskoordinaten auf. Da am Papierrand die Anwendung des zentralen Differenzenquotienten nach Gl. (4.88) nicht möglich ist, werden hier die Differenzenquotienten nach folgender Vorschrift gebildet:

$$\left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_i = \frac{F_{i+1} - F_i}{\Delta z} \quad (4.90)$$

oder

$$\left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_i = \frac{F_i - F_{i-1}}{\Delta z} \quad (4.91)$$

Die sich ergebenden gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung lassen sich mit einem Unterprogramm aus der "NAG - Programmbibliothek" lösen.

Diese Lösungsroutine mit der Bezeichnung "D02EBF" arbeitet mit einem Predictor-Corrector-Verfahren nach GEAR, welches im Anhang dieser Arbeit näher beschrieben wird.

## 4.7 Anfangs- und Randbedingungen

Für jede der  $(i + 1)$  Differentialgleichungen ( $i$  ist die Anzahl der adsorbierten Komponenten) dieses gemischten Anfangs- und Randwertproblems sind zwei Randbedingungen und eine Anfangsbedingung erforderlich.

### 4.7.1 Anfangsbedingungen

Die Anfangsbedingungen lauten:

$$p_{WD}(z, t = 0) = p_{WD0}(z) \quad (4.92)$$

und

$$T(z, t=0) = T_0(z) \quad (4.93)$$

## 4.7.2 Randbedingungen

### 4.7.2.1 Partialdrücke des Wasserdampfes an den Papierrändern

Die Randbedingungen werden über Massen- und Energiebilanzen an den beiden Papierrändern ermittelt (Bild 4.5). Die Herleitung erfolgt zunächst für den "unteren" Papierrand an der Stelle  $z = 0$ .

Die Massenbilanz lautet:

$$\dot{m}_{WD1} = \dot{m}_{WD2} + \dot{m}_{WD,Des} \quad (4.94)$$

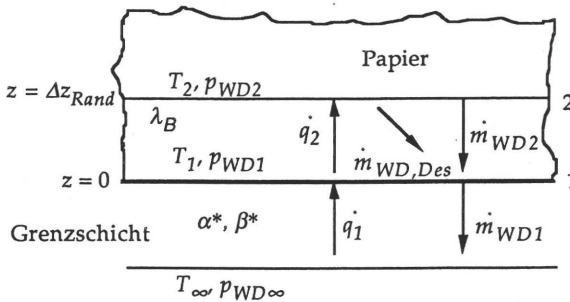


Bild 4.5: Bilanz am Papierrand

Wegen der dünnen Randschicht ( $\Delta z_{Rand} = 0,01 \Delta z$ , vgl. Kap. 4.6) ist der sich dort infolge Desorption einstellende Wasserdampfmassestrom  $\dot{m}_{WD,Des}$  in der Randschicht im Vergleich zu den zu- und abströmenden Massenströmen vernachlässigbar.

$$\dot{m}_{WD1} = \dot{m}_{WD2} = \dot{m}_{WD} \quad (4.95)$$

Für die Massenstromdichte des Dampfes von der Papieroberfläche zur Trockneratmosphäre  $\dot{m}_{WD1}$  gilt (vgl. /3.10/, S. 245):

$$\dot{m}_{WD1} = -\beta^* \frac{M_W p}{R T_G} \frac{p_{WD1} - p_{WD\infty}}{p - p_{WD1}} \quad (4.96)$$

mit dem vom Stoffstrom selbst beeinflussten Stoffübergangskoeffizienten  $\beta^*$ , der nach /3.10/, S. 250 gegeben ist durch:

$$\beta^* = \frac{\ln(1 + B)}{B} \beta \quad (4.97)$$

mit

$$B = \frac{p_{WD1} - p_{WD\infty}}{p - p_{WD1}} \quad (4.98)$$

und dem Stoffübergangskoeffizienten  $\beta$ , der in Kap. 4.7.2.3 ausführlich besprochen wird.

Wegen der dünnen Randschicht ( $\Delta z_{Rand} = 0,01 \Delta z$ , vgl. Kap. 4.6) liegen sowohl die Werte für die Partialdampfdrücke  $p_{WD1}$  und  $p_{WD2}$  als auch die der Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  sehr nahe beieinander. Somit lassen sich zur Vermeidung unnötigen Rechenaufwandes folgende Vereinfachungen annehmen:

1. Zur Berechnung des Faktors  $B$  (Gl. (4.98)) und somit des Stoffübergangskoeffizienten  $\beta^*$  (Gl. (4.97)) wird anstatt des Partialdampfdruckes  $p_{WD1}$  der Wert an der Stelle 2  $p_{WD2}$  eingesetzt.
2. Die mittlere Grenzschichttemperatur  $T_G$  in Gl. (4.96) wird anstatt mit der Randtemperatur  $T_1$  mit der Temperatur an der Stelle 2  $T_2$  berechnet.

$$T_G = \frac{T_1 + T_\infty}{2} \approx \frac{T_2 + T_\infty}{2} \quad (4.99)$$

Die Massenstromdichte des durch die Papierrandschicht diffundierenden Wasserdampfes  $\dot{m}_{WD2}$  gegeben durch:

$$\dot{m}_{WD2} = -D_{WL} \frac{M_W p}{R T_R} \frac{1}{p - p_{WD}} \frac{\partial p_{WD}}{\partial z} \quad (4.100)$$

Die mittlere Randtemperatur wird vereinfachend  $T_R = T_2$  gesetzt (vgl. Gl. 4.99). Aufgrund der dünnen Randschicht  $\Delta z_{Rand} = 0,01 \Delta z$  sind die Partialdampfdrücke am Rand (Stelle 1) und an der Stelle 2 nur wenig voneinander verschieden. Nach /3.10/, S. 180 gilt dann für die Massenstromdichte  $\dot{m}_{WD2}$  näherungsweise folgende Beziehung:

$$\dot{m}_{WD2} \approx \frac{D_{WL}}{\Delta z_{Rand}} \frac{M_W p}{R T_2} \frac{p_{WD1} - p_{WD2}}{p - p_{WD1}} \quad (4.101)$$

Zusammenfassen der Gleichungen (4.96) und (4.101) liefert die gesuchte Randbedingung für den Papierrand bei  $z = 0$ :

$$\beta^* \frac{M_W p}{R T_G} \frac{p_{WD\infty} - p_{WD1}}{p - p_{WD1}} = \frac{D_{WL}}{\Delta z_{Rand}} \frac{M_W p}{R T_2} \frac{p_{WD1} - p_{WD2}}{p - p_{WD1}} \quad (4.102)$$

Umformen und Auflösen nach dem Partialdampfdruck am Papierrand  $p_{WD1}$  ergibt:

$$p_{WD1} = \frac{p_{WD2} + \frac{\beta^* \Delta z_{Rand}}{D_{WL}} \frac{T_2}{T_G} p_{WD\infty}}{1 + \frac{\beta^* \Delta z_{Rand}}{D_{WL}} \frac{T_2}{T_G}} \quad (4.103)$$

Analoges Vorgehen führt am oberen Papierrand (Stelle  $N+2$ ,  $z = s_B$ ) zu:

$$p_{WDN+2} = \frac{p_{WDN+1} + \frac{\beta^* \Delta z_{Rand}}{D_{WL}} \frac{T_{N+1}}{T_G} p_{WD\infty}}{1 + \frac{\beta^* \Delta z_{Rand}}{D_{WL}} \frac{T_{N+1}}{T_G}} \quad (4.104)$$

## 4.7.2.2 Randtemperaturen

Die Energiebilanz liefert (unter der obengenannten Voraussetzung, daß  $\dot{m}_{WD,Des}$  in der Randschicht vernachlässigbar ist):

$$\dot{q}_1 + \dot{m}_{WD2} h_{WD2} = \dot{q}_2 + \dot{m}_{WD1} h_{WD1} \quad (4.105)$$

Mit  $\dot{m}_{WD1} = \dot{m}_{WD2} = \dot{m}_{WD}$  (Gl. (4.95)) ergibt sich:

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_2 + \dot{m}_{WD} (h_{WD1} - h_{WD2}) \quad (4.106)$$

Die Wärmestromdichte  $\dot{q}_1$  wird vom Trocknungsmedium konvektiv auf das Papier übertragen.

$$\dot{q}_1 = \alpha^* (T_\infty - T_1) \quad (4.107)$$

Der Zusammenhang zwischen dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  und dem vom Stoffstrom beeinflussten Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha^*$  ist nach [3.10/, S. 253 gegeben durch:

$$\alpha^* = \frac{\ln(1+B)\gamma}{(1+B)\gamma - 1} \alpha \quad (4.108)$$

Für die Stoffpaarung Wasser - Luft ist  $\gamma = 1,3$ . Für  $B$  ist Gl. (4.98) einzusetzen.

Innerhalb der Papierrandschicht erfolgt der Wärmetransport durch Wärmeleitung.

$$\dot{q}_2 = -\lambda_B \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.109)$$

Vergleichsrechnungen mit und ohne den in Gl. (4.106) enthaltenen Enthalpiestrom

$$\dot{m}_{WD} (h_{WD1} - h_{WD2}) = \dot{m}_{WD} c_{p,WD} (T_1 - T_2) \quad (4.110)$$



haben gezeigt, daß der Einfluß dieses Terms auf das Rechenergebnis vernachlässigbar klein ist. Deshalb wird dieser in den nachfolgenden Ausführungen nicht mehr berücksichtigt.

Zusammenfassen der Gleichungen (4.106), (4.107) und (4.109) liefert die gesuchte Randbedingung bei  $z = 0$ :

$$\alpha^* (T_\infty - T_1) = -\lambda_B \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.111)$$

Für  $z = s_B$  gilt:

$$\alpha^* (T_\infty - T_{N+2}) = \lambda_B \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.112)$$

Die Randtemperaturen in der Schreibweise der finiten Differenzen berechnen sich daraufhin zu:

$$T_1 = \frac{\alpha^* T_\infty + \left( \frac{\lambda_B}{\Delta z_{Rand}} \right) T_2}{\alpha^* + \frac{\lambda_B}{\Delta z_{Rand}}} \quad (4.113)$$

$$T_{N+2} = \frac{\alpha^* T_\infty + \left( \frac{\lambda_B}{\Delta z_{Rand}} \right) T_{N+1}}{\alpha^* + \frac{\lambda_B}{\Delta z_{Rand}}} \quad (4.114)$$

#### 4.7.2.3 Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten

Zur Berechnung der Randwerte für die Temperatur und des Wasserdampfpartialdruckes werden die Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$  benötigt. Maßgeblich für die Leistungsfähigkeit eines Trockners sind nicht die örtlichen, sondern die durchschnittlichen Werte für den Wärme- und Stoffübergang (/2.1/, S. 168).

Nach /2.1/, S. 170 lassen sich die integralen Mittelwerte der Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten beim Prallstrahltrockner mit Schlitzdüsen mit folgenden Gleichungen berechnen:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,42}} = \frac{Sh}{Sc^{0,42}} = \frac{2}{3} Re^{2/3} f_{Ac}^{3/4} \frac{2}{f_A/f_{Ac} + f_{Ac}/f_A} \quad (4.115 \text{ a, b})$$

Die Gleichungen (4.115 a und b) gelten unter den folgenden Voraussetzungen:

- $1 < h/d' < 40$
- $0,008 < f_A < 2 f_{Ac} \ (h/d')$
- $1,5 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^4$

Diese Bedingungen sind bei den im Rollenoffsetverfahren zur Anwendung kommenden Trocknern im allgemeinen erfüllt ( $3,33 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^4$ ;  $8 < h/d' < 12$ ;  $0,01 < f_A < 0,5$  und  $2 f_{Ac} \ (h/d') \approx 1,2$ ).

Die einzelnen Kennzahlen und Größen sind wie folgt definiert:

• NUSSELTZAHL:  $Nu = \frac{\alpha d'}{\lambda_L}$  (4.116)

$\lambda_L$  - Wärmeleitfähigkeit der Luft [W/m K]

• Hydraulischer Durchmesser:  $d' = 2 b_D$  (4.117)

$b_D$  - Breite des Düsen Schlitzes [m]

• SHERWOODZAHL:  $Sh = \frac{\beta d'}{D_{WL}}$  (4.118)

$D_{WL}$  - Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion Wasser-Luft [m<sup>2</sup>/s]

• PRANDTLZAHL:  $Pr = \frac{v_L}{a_L}$  (4.119)

$a_L$  – Temperaturleitkoeffizient [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $v_L$  – Dynamische Viskosität der Luft [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

• SCHMIDTZAHL:  $Sc = \frac{v_L}{D_{WL}'}$  (4.120)

• REYNOLDSZAHL:  $Re = \frac{w_D d'}{v_L}$  (4.121)

$w_D$  – Mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Luft [ $\text{m/s}$ ]

• Flächenverhältnis:  $f_A = \frac{A_{DA}}{A_{AG}}$  (4.122)

$A_{AG}$  – Fläche des angeblasenen Bedruckstoffes [ $\text{m}^2$ ]  
 $A_{DA}$  – Fläche der Düsenöffnung [ $\text{m}^2$ ]

• Koeffizient:  $f_{Ac} = [60 + 4 (h/d' - 2)^2]^{-1/2}$  (4.123)

$h$  – Abstand Düsenöffnung zum Bedruckstoff [ $\text{m}$ ]

Auflösen der Gl. (4.116) nach dem Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  und Einsetzen der Gl. (4.115 a) ergibt:

$$\alpha = \frac{2}{3} Re^{2/3} f_{Ac}^{3/4} \frac{2}{f_A/f_{Ac} + f_{Ac}/f_A} Pr^{0,42} \frac{\lambda_L}{d'} \quad (4.124)$$

Analoges Vorgehen mit den Gleichungen (4.118) und (4.115 b) liefert für den Stoffübergangskoeffizienten  $\beta$ :

$$\beta = \frac{2}{3} Re^{2/3} f_{Ac}^{3/4} \frac{2}{f_A/f_{Ac} + f_{Ac}/f_A} Sc^{0,42} \frac{D_{WL}'}{d'} \quad (4.125)$$

## 5 Stoff- und Prozeßdaten

### 5.1 Papierdaten

Die beim Rollenoffsetverfahren zur Anwendung kommenden Bedruckstoffe lassen sich in ungestrichene und gestrichene Papiere einteilen. Diese beiden Hauptgruppen weisen grundsätzliche Unterschiede im Aufbau und in ihren Eigenschaften auf. Im folgenden werden die für die in Kap. 6 vorgestellten Untersuchungen relevanten Stoffdaten aufgezeigt.

#### 5.1.1 Mikroskopische Untersuchungen zur Papierdicke und -dichte

Für die Dickenmessung von Papier werden meist Mikrometerschrauben eingesetzt, die mit einer definierten Flächenpressung von  $10 \text{ N/m}^2$  auf das Probeblatt einwirken. Wegen der daraus resultierenden Papierverformung ist diese Methode umstritten (siehe hierzu /4.5/, p. 2). Bei der mikroskopischen Untersuchung des Papierquerschnitts bleibt dagegen die ursprüngliche Form des Papiers erhalten und die Schichtdicken lassen sich exakt bestimmen.

Die sog. Mikroskopie (siehe hierzu auch /5.1/) gibt über eine Reihe von druck- und trocknungstechnisch relevanten Einflüssen Aufschluß:

- Struktur des Papiers
- Bestimmung der Papierdicke
- Bestimmung der Farbschichtdicke
- Eindringtiefe von Druckfarbenbestandteilen
- Eindringtiefe der Streichmasse
- Bestimmung der Dichte des Papiers

##### 5.1.1.1 Probenpräparation und Mikroskopie

Der wichtigste und schwierigste Schritt bei der Papieruntersuchung mit dem Mikroskop ist die Herstellung und Präparation der Bedruckstoffproben. Dazu werden kleine Papierstücke mit 20 mm Länge und 5 mm Breite in eine geeignete Kunstharzmasse - im vorliegenden Fall Araldit - eingebettet. Nachdem das Harz

ausgehärtet ist, werden mit einem sog. Grundschlittenmikrotom 5 bis 10  $\mu\text{m}$  dicke Probenscheiben hergestellt und diese zwischen einem Objektträger und einem Deckglas montiert. Dabei ist die Probe mit einem Immersionsöl - ein synthetisches Öl mit definierter optischer Brechzahl - zu benetzen, um Reflexionen und Newtonringe zwischen Deckglas, Objektträger und Papierschnitt zu verhindern.

Bei der anschließenden mikroskopischen Untersuchung wird das Durchlichtverfahren (für weitergehende Informationen siehe /5.2/) angewendet, mit der die Schichtdicken von Papier und der aufgetragenen Farben eindeutig bestimmt werden können.

Die Proben werden gemeinsam mit einem Maßstab unter dem Mikroskop fotografiert und anhand dieser Aufnahmen ausgewertet.

Die zu dieser Arbeit durchgeführten mikroskopischen Untersuchungen dienen der Bestimmung der Papierdicke  $s_B$  und -dichte  $\rho_{B,f}$ .

$$\rho_{B,f} = \frac{m_B}{s_B} \quad (5.1)$$

Für die Berechnung der Dichte ist zusätzlich die Kenntnis der flächenbezogenen Papiermasse  $m_B$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] erforderlich.

Zu ihrer Bestimmung werden mittels eines sog. Rundprobenschneiders 100  $\text{cm}^2$  große Papierproben hergestellt und mit einer hochauflösenden Analysenwaage (Auflösung:  $10^{-4}$  g) gewogen.

Die flächenbezogene Masse des trockenen Papiers  $m_{B,tr}$  wird nach der sog. Dörr-Wägemethode (DIN ISO 289) bestimmt. Dazu werden die zuvor beschriebenen Proben in einem Trockenschrank bei einer Temperatur von  $\vartheta = 105^\circ\text{C}$  bis zur Massekonstanz getrocknet. Für gestrichene Papiere wird dazu eine Verweilzeit im Trockenschrank von 4 h benötigt. Die dabei im Papier verbleibende Feuchtebelastung ist vernachlässigbar klein.

#### 5.1.1.2 Dichte der Papiere

Während der hier beschriebenen Untersuchungen wurden flächenbezogene Papiermassen von  $m_B = 35 \text{ g}/\text{m}^2$  (Telefonbücher) bis  $135 \text{ g}/\text{m}^2$  (Hochglanz-

prospekte) gemessen. Wie bereits angesprochen, werden im folgenden Papiere ohne und mit Strichauftrag separat behandelt.

Je nach Herstellungsprozeß weisen ungestrichene Papiere große Unterschiede hinsichtlich Oberflächenstruktur und Dichte auf. Es wurden Dichten von  $\rho_B = 600 \text{ kg/m}^3$  (Naturpapiere) bis  $1100 \text{ kg/m}^3$  (sanierte oder SC-Papiere) ermittelt. Die Bilder 5.1 und 5.2 zeigen Schnitte eines Naturpapiers und eines gestrichenen Papiers.

Bei Naturpapieren treten Dickenschwankungen von 5 bis  $10 \mu\text{m}$  auf, die bei sanierten und gestrichenen Papieren auf 1 bis  $2 \mu\text{m}$  reduziert sind. Für die Ermittlung der Dichte von Naturpapieren wird die mittlere Papierdicke eingesetzt.

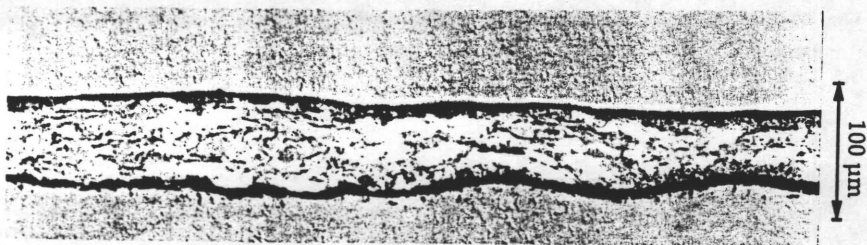


Bild 5.1: Schnitt eines Naturpapiers

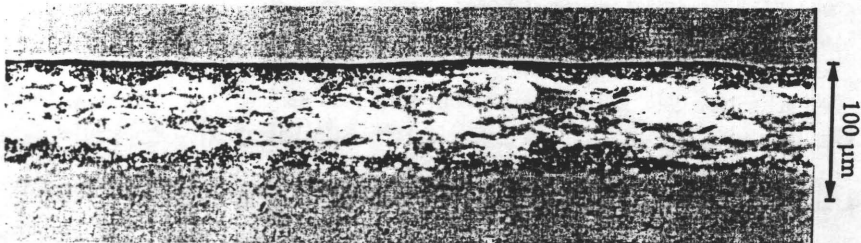


Bild 5.2: Schnitt eines gestrichenen Papiers

Gestrichene Papiere weisen in der Regel höhere Dichten als ungestrichene auf. Pro Bahnseite werden 4 bis  $15 \text{ g/m}^2$  Streichmasse mit einer Dichte von  $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$  aufgetragen. Für die hier untersuchten gestrichenen Papiere wurden Dichten von  $\rho_B = 750$  bis  $1250 \text{ kg/m}^3$  ermittelt.

Für die in Kap. 6 beschriebenen Untersuchungen werden Papiere mit folgenden Dichten ausgewählt:

- Ungestrichenes Papier:  $\rho_{B,f} = 800 \text{ kg/m}^3$
- Gestrichenes Papier:  $\rho_{B,f} = 1300 \text{ kg/m}^3$

### 5.1.2 Porosität und Tortuositätsfaktor

Für die Diffusion innerhalb des Papiers sind der Tortuositätsfaktor  $\mu_{B,D}$  und die Porosität  $\varepsilon$  maßgeblich (vgl. Gl. (4.83)).

Die Porosität von ungestrichenem Papier wird nach /4.5/ berechnet über:

$$\varepsilon_{NP} = 1 - \frac{\rho_{B,f}}{\rho_Z} \quad (5.2)$$

Darin ist  $\rho_Z$  die Dichte der Zellulose, die in /5.3/ mit  $\rho_Z = 1500 \text{ kg/m}^3$  angegeben wird. Für das zuvor ausgewählte Papier ergibt sich eine Porosität von  $\varepsilon_{NP} = 0,47$ . Für den Tortuositätsfaktor wird nach /4.3/, S. 76  $\mu_{B,D} = 3$  eingesetzt.

Zum Diffusionswiderstand gestrichener Papiere werden in der Literatur keine Angaben gemacht. Die Streichmasse vergrößert diesen Widerstand gegenüber ungestrichenen Papieren. Im Rahmen der in Kap. 6.4 behandelten experimentellen Untersuchungen zeigt sich, daß die gemessenen und berechneten Werte für eine Porosität von  $\varepsilon_{GP} = \varepsilon_{NP}/2$  und einen Tortuositätsfaktor von  $\mu_{B,D} = 5$  gut korrelieren.

Nach /4.3/, S. 76 wird  $\mu_{B,Kn} = (\mu_{B,D})^{1,75}$  gesetzt.

Anmerkung: Bei der Porositätsbestimmung nach BENDTSEN wird Luft durch Papier hindurchgeblasen und die auf der Rückseite ankommende Luftmenge gemessen. Die Bezeichnung Porositätsmessung ist in diesem Zusammenhang irreführend, da diese Untersuchungsmethode keinen Aufschluß über die eigentliche Porosität gibt, sondern als Maß für den Strömungswiderstand anzusehen ist.

### 5.1.3 Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität des Papiers

Die Wärmeleitfähigkeit und die spez. Wärmekapazität der Papiere werden der Literatur entnommen:

- Wärmeleitfähigkeit des ungestrichenen Papiers (/5.4/, /5.5/):  $\lambda_B = 0,14 \text{ W/(m K)}$
- Wärmeleitfähigkeit des gestrichenen Papiers (/5.6/):  $\lambda_B = 0,169 \text{ W/(m K)}$

Für beide Bedruckstoffe wird die gleiche spez. Wärmekapazität nach /5.5/ eingesetzt:

- Spez. Wärmekapazität:  $c_B = 1,34 \text{ kJ/(kg K)}$

### 5.1.4 Konstanten des Sorptionsgleichgewichts

Das Gleichgewicht zwischen Feuchtebeladung, Wasserdampfkonzentration und Temperatur des Papiers wird durch die BET-Gleichung (vgl. Gleichungen (4.60), (4.61) und (4.62)) beschrieben.

$$X = X_{mono} \frac{b \varphi}{1 - \varphi} \frac{1 - 4 \varphi^3 + 3 \varphi^4}{1 + (b - 1) \varphi - b \varphi^4} \quad (5.3)$$

mit der relativen Luftfeuchtigkeit  $\varphi$

$$\varphi = \frac{p_{WD}}{p_{WD}''} \quad (5.4)$$

und dem Faktor der Sorptionsisothermen

$$b = b_0 \exp \left( \frac{h_{B,W}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \quad (5.5)$$

Dazu sind die monomolekulare Beladung  $X_{mono}$ , die Bindungsenthalpie  $h_{B,W}$  und die Sorptionsgleichgewichtskonstante  $b_0$  zu bestimmen.



Die Aufnahme der Sorptionsisothermen von Wasserdampf an Papier wird mittels einer einfachen Methode nach /5.7/ durchgeführt. Während sich über einer freien Wasseroberfläche der Sättigungsdampfdruck (Gl. (5.6)) einstellt, tritt über einer gesättigten, wässrigen Salzlösung eine vom gewählten Salz abhängige Dampfdruckabsenkung ein.

Zur Bestimmung des Gleichgewichts werden Wägeschälchen mit 1 bis 2 g Papier in einen Glasbehälter mit 2 l Inhalt eingebracht. Die Schälchen stehen auf einem Gestell, unter dem sich die entsprechende gesättigte Salzlösung mit bekanntem Dampfdruck befindet. Die Glasgefäße werden luftdicht verschlossen und in einen auf die gewünschte Temperatur thermostatierten Trockenschrank gestellt. Nach 48 h werden die Papierproben auf einer Analysenwaage gewogen. Die Bestimmung der Masse des trockenen Papiers erfolgt nach der in Kap. 5.1.1.1 beschriebenen Dörr-Wägemethode.

Für die hier untersuchten Papiere ergeben sich durch Anpassen der Kurven an die Meßpunkte folgende Werte (vgl. Bild 5.3 und 5.4):

- Bindungsenthalpie:  $h_{B,W} = 10\,000 \text{ kJ/kmol}$
- Sorptionsgleichgewichtskonstante:  $b_0 = 5$
- Monomolekulare Beladung
 

Ungestrichenes Papier:	$X_{mono} = 0,069$
Gestrichenes Papier:	$X_{mono} = 0,044$

Des weiteren ist der Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes  $p_{WD}''$  in der BET-Gleichung enthalten, der nach /4.8/ temperaturabhängig gegeben ist durch (vgl. Gl. (4.63) (siehe auch Bild 5.8):

$$p_{WD}'' = 10^{\left(-\frac{A}{T} + B + C \lg T\right)} \quad (5.6)$$

Für den Sättigungsdampfdruck in der Einheit [Pa] sind nach /4.8/ folgende Werte einzusetzen:

- $A = 2864,9242$
- $B = 23,92435$
- $C = -4,37179$

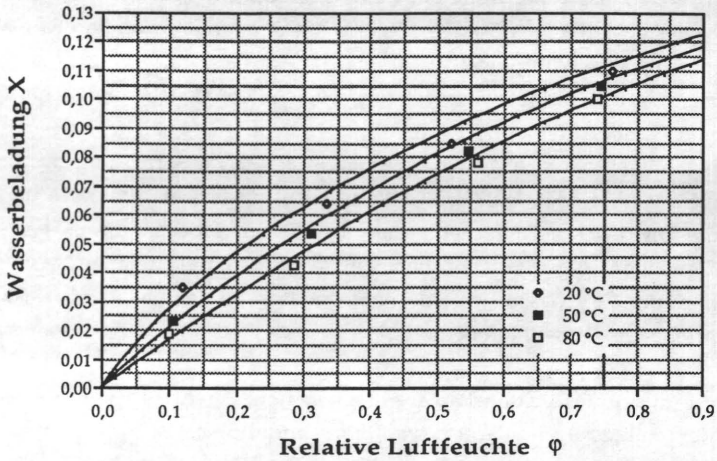


Bild 5.3: Sorptionsisothermen von Wasser an Naturpapier

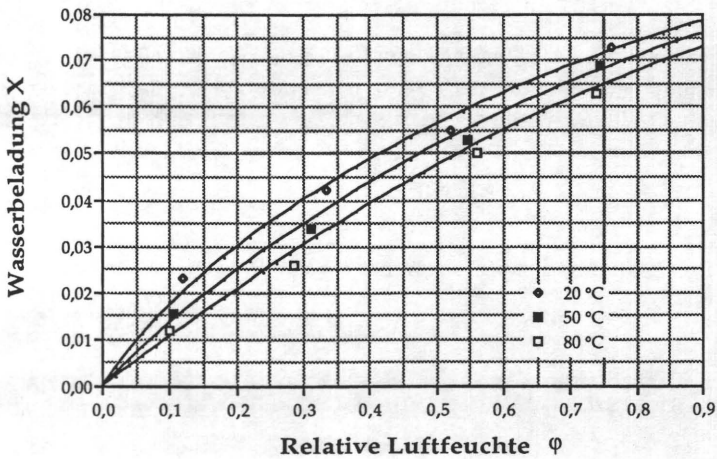


Bild 5.4: Sorptionsisothermen von Wasser an gestrichenem Papier

### 5.1.5 Feuchtebeladung der Papiere vor der Trocknung

Die Papierfeuchtebeladung  $X$  ist der Quotient aus der Masse des im Papier gebundenen Wassers und der Masse des trockenen Papiers. Dazu werden die flächenbezogenen Massen des feuchten ( $m_B$ ) und des trockenen Bedruckstoffs ( $m_{B,tr}$ ) ermittelt und die Beladung nach Gl. (5.7) berechnet:

$$X = \frac{m_B - m_{B,tr}}{m_{B,tr}} \quad (5.7)$$

Die Feuchtebeladung in einer Papierrolle vor dem Druckvorgang hängt u. a. von folgenden Einflüssen ab:

1. Trocknungsprozeß bei der Papierherstellung.
2. Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei der Lagerung.
3. Lagerungsdauer.

Dem Trocknungsprozeß bei der Papierherstellung (Punkt 1.) kommt dabei die größte Bedeutung zu. Das Papier wird am Ende des Herstellungsprozesses zu Rollen aufgewickelt, deren vom Trocknungsprozeß in der Papiermaschine bestimmte Feuchtebeladung meist vom Gleichgewichtszustand bei der nachfolgenden Lagerung abweicht. Die Folge ist Diffusion und Ad- bzw. Desorption von Wasserdampf im Papier, bis der Gleichgewichtszustand entsprechend der Sorptionsisothermen erreicht ist. Aufgrund der langen Diffusionswege im aufgerollten Bedruckstoff (Durchmesser  $d_B > 1$  m, Breite  $b_B \approx 1$  m) kann dieser Vorgang mehrere Wochen oder Monate dauern. Während dieser Zeitspanne lassen sich Feuchtedifferenzen sowohl in radialer wie auch axialer Richtung der Papierrollen feststellen.

Daraus resultiert die Forderung, Papier bereits bei der Herstellung mit einer definierten Feuchtebeladung zu versehen, die durch entsprechende Klimatisierung der Lagerräume bis zur Verarbeitung in der Druckmaschine beizubehalten ist.

Die mit den Versuchen ermittelten Feuchtebeladungen entsprechen sehr gut den Werten, die als Ausgangszustand für das Bedrucken angestrebt werden.

- Naturpapier:  $X_p = 0,08$
- Gestrichenes Papier:  $X_p = 0,043$

Bei dem z. Zt. überwiegend angewendeten Naß-Offsetverfahren nimmt das Papier nach /5.8/ während der Druckvorgänge zusätzlich ca. 2,0 bis 2,5 g/m<sup>2</sup> Wasser auf, wodurch sich die Anfangsfeuchtebelastung vor der Trocknung abhängig von der flächenbezogenen Papiermasse erhöht. Deshalb wird hier für den Vierfarbendruck ein Wert von  $\Delta m_W = 2,2 \text{ g/m}^2$  angenommen.

## 5.2 Diffusionskoeffizienten

Für die Berechnungen werden der binäre und der äquivalente Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion und der äquivalente Diffusionskoeffizient für Molekularbewegung nach KNUDSEN benötigt.

### 5.2.1 Binärer und äquivalenter Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion

Der binäre Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion  $D_{WL}'$  wird nach Gl. (4.84) druck- und temperaturabhängig berechnet.

$$D_{WL}' = \frac{1,013 \cdot T^{1,75} \left( \frac{M_L + M_W}{M_L \cdot M_W} \right)^{1/2} \cdot 10^{-2}}{p \left( (\Sigma v_{DL})^{1/3} + (\Sigma v_{DW})^{1/3} \right)^2} = k_{D,WL} \frac{T^{1,75}}{p} \quad (5.8)$$

Einsetzen der Molmassen ( $M_L = 29 \text{ kg/kmol}$ ;  $M_W = 18 \text{ kg/kmol}$ ) und der Diffusionsvolumina ( $v_{DL} = 20,1$ ;  $v_{DW} = 12,7$  nach /4.7/) ergibt für den konstanten Anteil von Gl. (5.8)  $k_{D,WL} = 1,191 \cdot 10^{-4} \text{ N/(s K}^{1,75})$  und damit für den binären Diffusionskoeffizienten  $D_{WL}'$  in [m<sup>2</sup>/s]:

$$D_{WL}' = 1,191 \cdot 10^{-4} \frac{T^{1,75}}{p} \quad (5.9)$$

Nach Gl. (4.82) ergibt sich daraus für den äquivalenten Diffusionskoeffizienten  $D_{D,WL}$ :

$$D_{D,WL} = \frac{D_{WL}'}{\mu} = \frac{\varepsilon}{\mu_{B,D}} D_{WL}' = 1,191 \cdot 10^{-4} \frac{\varepsilon}{\mu_{B,D}} \frac{T^{1,75}}{p} \quad (5.10)$$

### 5.2.2 Diffusionskoeffizient für Molekularbewegung nach KNUDSEN

Der äquivalente Diffusionskoeffizient für die Molekularbewegung nach KNUDSEN ist gegeben durch (vgl. Gl. (4.86) und (4.87)):

$$D_{Kn} = \frac{\varepsilon}{\mu_{B,Kn}} \frac{4}{3} \sqrt{\frac{R T}{2 \pi M_W}} d = 8,574 \frac{\varepsilon}{\mu_{B,Kn}} d T^{0,5} \quad (5.11)$$

Dazu werden nach /4.5/ folgende mittlere Porendurchmesser  $d$  der Bedruckstoffe eingesetzt:

- Naturpapier:  $d = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
- Gestr. Papier:  $d = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}$

Die Bilder 5.5 und 5.6 zeigen die äquivalenten Diffusionskoeffizienten für Gasdiffusion  $D_{D,WL}$ , Molekularbewegung  $D_{Kn}$  und die Überlagerung der Transportmechanismen  $D_{WL}$  der ausgewählten Papiere in Abhängigkeit der Temperatur. Es wird deutlich, daß beim Naturpapier der Einfluß der Gasdiffusion und beim gestrichenen Papier der Einfluß der Molekularbewegung nach KNUDSEN überwiegt.

Der äquivalente Diffusionskoeffizient  $D_{WL}$  für das Naturpapier ist etwa um den Faktor 100 größer als derjenige für das gestrichene Papier.

### 5.3 Trocknerdaten

Die Grundlagen der Prallstrahlschwebetrocknung im Rollenoffsetverfahren sind in Kap. 2.1 besprochen und werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

Die z. Zt. zur Anwendung kommenden Trocknersysteme im Rollenoffsetdruck sind in der prinzipiellen Wirkungsweise gleich. Je nach Hersteller, Typ und Anforderungen sind jedoch die konstruktive Gestaltung, die Abmessungen und die Betriebsweise unterschiedlich.

Die Trocknerdaten lassen sich in konstruktionsbedingte Kennwerte wie beispielsweise Abstand der Düsen voneinander, Abstand Düsenöffnung - Bahn

und Düsenöffnungsbreite und in Prozeßgrößen wie Umluft- und Abluftmenge,

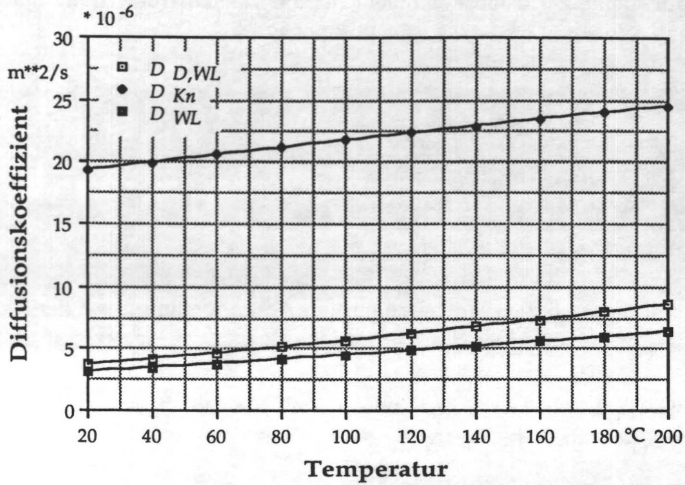


Bild 5.5: Diffusionskoeffizienten für Wasserdampf und Luft im Naturpapier

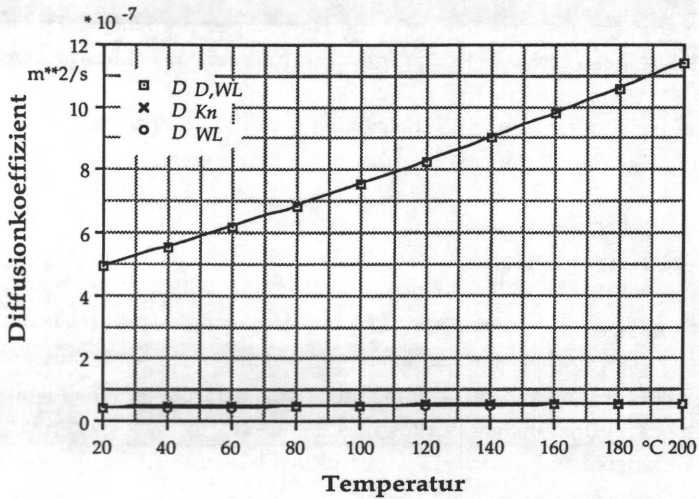


Bild 5.6: Diffusionskoeffizienten für Wasserdampf und Luft im gestrichenen Papier

Düsenaustrittsgeschwindigkeit, Temperatur und Wasserdampfpartialdichte der Trocknungsluft unterteilen.

Mit Ausnahme der beiden letztgenannten Größen werden Angaben der Trocknerhersteller übernommen. Die Trocknungslufttemperaturen werden durch Messungen ermittelt, während die Wasserdampfpartialdichte über eine Bilanzrechnung bestimmt wird. Dazu werden der Gesamtluftmassenstrom im Trockner, die Zu- bzw. Abluftmenge, die Wasserdampfpartialdichte der Zuluft und die aus dem Papier ausgetriebene Masse des Wassers benötigt. Die beteiligten Luftmassenströme sind von den jeweiligen Anforderungen abhängig. Die folgenden Angaben beziehen sich auf Trockner für Bahngeschwindigkeiten von bis zu  $v_B = 10$  m/s und Bahnbreiten von  $b_B = 1$  m.

- Gesamtluftstrom im Trockner:  $V_{Lges} = 30000$  bis  $45000$  m<sup>3</sup>/h
- Gesamtluftmassenstrom:  $m_{Lges} = 10,8$  bis  $16,2$  kg/s
- Zu- bzw. Abluftstrom:  $V_1 = V_2 = 4000$  bis  $4500$  m<sup>3</sup>/h
- Zu- bzw. Abluftmassenstrom:  $m_{L1} = m_{L2} = 1,44$  bis  $1,62$  kg/s
- Wasserdampfpartialdichte der Zuluft:  $\rho_{WD} = 0,01$  kg/m<sup>3</sup>

Je nach Papiersorte, flächenbezogener Papiermasse und Bahnbreite werden im Trockner 0,03 bis 0,07 kg/s Wasser ausgetrieben. Der Anteil der Zu- bzw. Abluftmenge an der insgesamt im Trockner umgewälzten Luftmenge beträgt 10 bis 15 %. Eine Massenbilanz mit den genannten Werten ergibt Wasserdampfpartialdichten in der Trocknungsluft von  $\rho_{WD\infty} = 0,03$  bis  $0,065$  kg/m<sup>3</sup>. Bei der Trocknung eines durchschnittlichen Papiers mit  $m_B = 80$  g/m<sup>2</sup> ergibt sich  $\rho_{WD\infty} \approx 0,05$  kg/m<sup>3</sup>.

Für die konstruktiv bedingten Kenngrößen gelten durchschnittlich die folgenden Werte. Die in Klammern stehenden fettgedruckten Werte werden in Kap. 6 verwendet.

- Düsenschlitzbreite:  $b_D = 2$  bis  $3$  mm (**2,5 mm**)
- Abstand zweier Düsenbalken:  $a_D = 0,2$  bis  $0,3$  m (**0,25 m**)
- Abstand Düsenöffnung - Bahn:  $h = 40$  bis  $60$  mm (**60 mm**)
- Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Luft:  $w_D = 55$  bis  $80$  m/s (**60 m/s**)

Die verschiedenen Temperaturen der Trocknungsluft werden in Kap. 6 festgelegt.

## 5.4 Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten

Die Gleichungen der Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten (Gleichungen (4.124) und (4.125)) sind in Kap. 4.7.3 dargestellt. Die meisten der darin enthaltenen Einflußgrößen wie die Trocknerdaten und der binäre Diffusionskoeffizient für Gasdiffusion sind in den vorherigen Kapiteln bereits besprochen worden. Darüber hinaus werden die zur Bestimmung der dimensionslosen Kennzahlen  $Nu$ ,  $Re$  und  $Pr$  erforderlichen temperaturabhängigen Stoffwerte der Trocknungsluft - der Temperaturleitkoeffizient  $a_L$  (Gl. (4.119)), die dynamische Viskosität  $\nu_L$  (Gleichungen (4.119), (4.120) und (4.121)) und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_L$  (Gl. (4.116)) - dem VDI-Wärmeatlas /4.7/ entnommen. In Bild 5.7 sind die durch Interpolation (Gleichungen (5.12) bis (5.14)) erzeugten Kurvenverläufe der genannten Größen über dem interessierenden Temperaturbereich aufgetragen.

$$a_L = 6,4 \cdot 10^{-14} T^3 + 2,37 \cdot 10^{-10} T^2 + 1,25 \cdot 10^{-8} T - 5,86 \cdot 10^{-7} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (5.12)$$

$$\nu_L = 3,08 \cdot 10^{-14} T^3 + 1,25 \cdot 10^{-10} T^2 + 2,72 \cdot 10^{-8} T - 2,81 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (5.13)$$

$$\lambda_L = 3,98 \cdot 10^{-15} T^3 - 1,08 \cdot 10^{-11} T^2 + 7,8 \cdot 10^{-8} T + 4,0 \cdot 10^{-6} \quad [\text{W}/(\text{m K})] \quad (5.14)$$

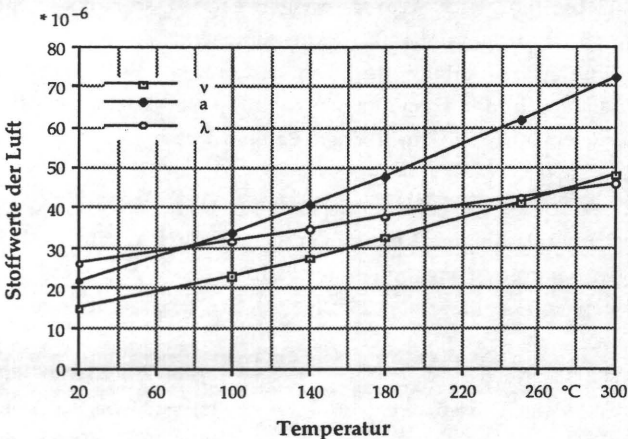


Bild 5.7: Dynamische Zähigkeit  $\nu_L$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], Wärmeleitkoeffizient  $\lambda_L$  [ $\text{W}/(\text{m K})$ ] und Temperaturleitkoeffizient  $a_L$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] der Luft in Abhängigkeit der Temperatur (aus /4.7/)



## 5.5 Verdunstung und Stoffwerte des Mineralöls

Die vorliegenden Untersuchungen verfolgen u. a. das Ziel, eine möglichst hohe Restfeuchtebelastung des Papiers bei gleichzeitig ausreichender Druckfarbentrocknung zu realisieren. Eine Bewertung der in Kap. 6 dargestellten Resultate erfordert folglich Aussagen über die ausgetriebene Menge des als Farbverdünnungsmittel verwendeten Mineralöls an bedruckten Papierflächen.

Die Farbtrocknung wird in dem in Kap. 4 beschriebenen Modell nicht berücksichtigt. Mit Hilfe von vereinfachenden Annahmen werden im folgenden Gleichungen zur überschlägigen Berechnung der Verdunstung des als Verdünnungsmittel verwendeten Mineralöls aufgezeigt. Es erfolgen getrennte Rechenläufe für Papierflächen mit und ohne Druckfarbe. Dabei wird Diffusion wie auch Adsorption von Mineralöldampf im Papier vernachlässigt.

Für die Massenstromdichte des Mineralöldampfes am "unteren Papierrand" (Stützstelle 1) gilt nach /3.10/, S. 245:

$$\dot{m}_{MD1} = \beta^* \frac{p}{R T_G} \frac{M_{MD}}{p - p_{MD1}} \quad (5.15)$$

Der Stoffübergangskoeffizient  $\beta^*$  wird mit den Gleichungen (4.84), (4.97) und (4.125) berechnet, wobei die entsprechenden Stoffwerte des Mineralöls einzusetzen sind. Die mittlere Grenzschichttemperatur  $T_G$  wird nach Gl. (4.99) bestimmt.

Es wird angenommen, daß sich in der Farbschicht und somit am Papierrand (Stützstelle 1) der Sättigungsdampfdruck einstellt.

$$p_{MD1} = p_{MD}^*(T_1) \quad (5.16)$$

Als Modells substanz für das Mineralöl wird das in Rollenoffsetfarben häufig enthaltene n-Tetradekan ( $C_{14}H_{30}$ ) mit den folgenden Stoffwerten (nach /4.7/) gewählt.

- |   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| • Molmasse:   | $M_M = 198 \text{ kg/kmol}$          |
| • Verdampfungsenthalpie bei $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ : | $h_{V,M0} = 426 \text{ kJ/kg}$       |
| • Spez. Wärmekapazität der Flüssigkeit:                     | $c_{p,Mfl} = 2,19 \text{ kJ/(kg K)}$ |
| • Spez. Wärmekapazität des Dampfes:                         | $c_{p,MD} = 1,71 \text{ kJ/(kg K)}$  |
| • Diffusionsvolumen (für Diffusionskoeffizienten):          | $v_{D,M} = 290,4$                    |

Für den temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck von n-Tetradekan gilt nach /4.8/ (siehe Bilder 5.8 und 5.9):

$$p_{MD}''(T) = 133,2 \cdot 10^{(8,765 - 3064/T)} \quad [\text{Pa}] \quad (5.17)$$

Die Dampfpartialdichte des Mineralöls im Trockner wird nach /2.3/ mit  $\rho_{MD\infty} = 0,003 \text{ kg/m}^3$  angenommen. Der entsprechende Dampfpartialdruck wird über das Gesetz idealer Gase (vgl. Gl. (4.15)) berechnet. Der Massenanteil des Mineralöls in der Druckfarbe beträgt 30 bis 40 % und wird hier mit 35 % angepaßt /2.3/.

Der an der Papieroberfläche stattfindende Verdunstungsprozeß beeinflusst die Randtemperatur. Die Energiebilanz am Papierrand wird durch den Energiestrom infolge Mineralölverdunstung ergänzt, so daß sich für die Randtemperatur an der Stelle 1 (vgl. Gl. (4.113)) folgender Zusammenhang ergibt:

$$T_1 = \frac{\alpha^* T_\infty + \left( \frac{\lambda_B}{\Delta z_{Rand}} \right) T_2 - \dot{m}_{MD} h_{V,M}}{\alpha^* + \frac{\lambda_B}{\Delta z_{Rand}}} \quad (5.18)$$

Für die Verdampfungsenthalpie gilt nach /3.10/, S. 13:

$$h_{V,M} = h_{V,M0} - (c_{p,Mfl} - c_{p,MD}) (T_1 - 273,15 \text{ K}) \quad (5.19)$$

Wegen der geringen Randschichtdicke von  $\Delta z_{Rand} = 0,01 \Delta z$  und dem daraus resultierenden kleinen Temperaturunterschied zwischen den Stützstellen 1 und 2 ( $\Delta T_{12} < 0,1 \text{ K}$ ), kann in den Gleichungen (5.17) und (5.19) anstatt mit  $T_1$  vereinfachend mit der Temperatur der Stelle 2 gerechnet werden. Damit wird unnötiger Rechenaufwand zur iterativen Lösung der Gl. (5.18) vermieden.

Die Bestimmung der flächenbezogenen verdunsteten Mineralölmenge  $m_{MD1}$  erfolgt mittels numerischer Integration der Trocknungsgeschwindigkeit über der Zeit.

$$m_{MD1} = \int_0^{t_T} \dot{m}_{MD1} dt \approx 0,5 \sum_{i=1}^n (\dot{m}_{MD1,i-1} + \dot{m}_{MD1,i}) \Delta t \quad (5.20)$$

mit der Anzahl der Zeitintervalle  $n = t_T / \Delta t$  und der Trocknerverweilzeit  $t_T$ . Analog wird an der Stützstelle N+2 ("oberer" Papierrand) vorgegangen.

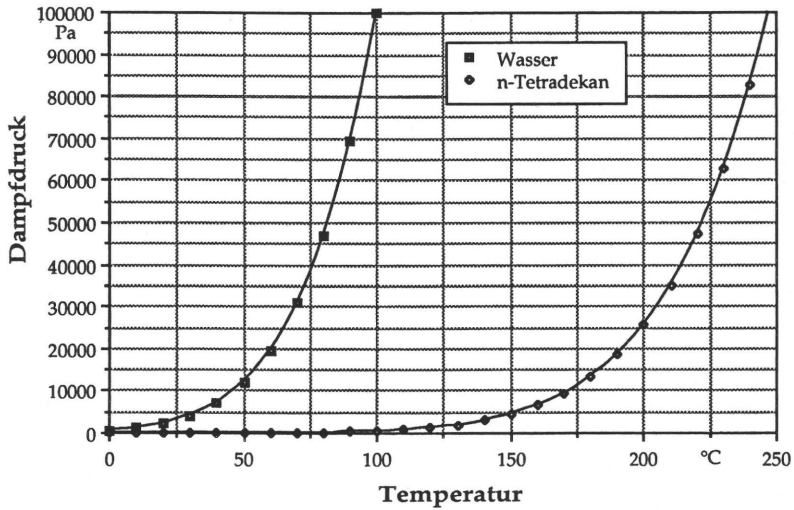
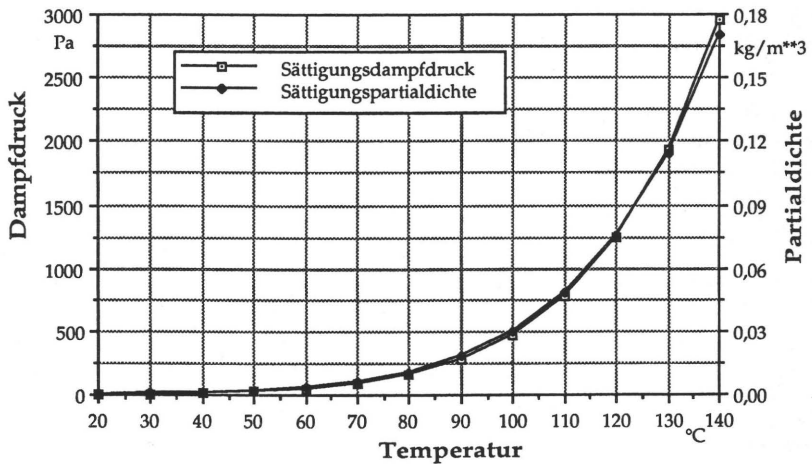


Bild 5.8: Sättigungsdampfdruckkurven für Wasser und n-Tetradekan

Bild 5.9: Sättigungsdampfdruck und -partialdichte für n-Tetradekan im relevanten Bereich der Bahntemperatur von  $\vartheta = 20$  bis  $140^\circ\text{C}$

## 6 Simulation des Wärme- und Stofftransports

Die in diesem Kapitel gezeigten Simulationsrechnungen zum Wärme- und Stofftransport werden für ein Naturpapier und ein gestrichenes Papier durchgeführt. Diese stellen hinsichtlich ihrer Stoffdaten wie z. B. Dichte, Diffusionswiderstand und Konstanten der Sorptionsisothermen Grenzfälle für die im Rollenoffsetverfahren zur Anwendung kommenden Bedruckstoffe dar.

Dazu werden folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Trocknerverweilzeit  $t_T$
- Temperatur der Trocknungsluft  $T_\infty$
- Flächenmasse des Papiers  $m_B$
- Anfangsfeuchtebeladung  $X_0$
- Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Trocknungsluft  $w_D$
- Wasserdampfpartialdichte  $\rho_{WD\infty}$  bzw. -partialdruck  $p_{WD\infty}$  des Trocknungsmediums, wobei  $p_{WD\infty} = \rho_{WD\infty} R T_\infty / M_W$  (vgl. (Gl. 4.15))

Folgende Werte werden bei den Rechnungen unverändert eingesetzt, sofern eine Größe nicht selbst als Variable auftritt:

- |   |   |
|---|---|
| • Temperatur der Trocknungsluft:                    | $\vartheta_\infty = 240^\circ\text{C}$  |
| • Wasserdampfpartialdichte in der Trocknungsluft:   | $\rho_{WD\infty} = 0,05 \text{ kg/m}^3$ |
| • Bahntemperatur am Trocknereintritt:               | $\vartheta_{B0} = 25^\circ\text{C}$     |
| • Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Trocknungsluft: | $w_D = 60 \text{ m/s}$                  |
| • Schlitzbreite der Düsen:                          | $b_D = 2,5 \text{ mm}$                  |
| • Abstand der Düsen voneinander:                    | $a_D = 250 \text{ mm}$                  |

Die jeweiligen Trocknerverweilzeiten werden bei den einzelnen Beispielen angegeben.

Um die Resultate für Naturpapier und gestrichenes Papier vergleichen zu können, werden für beide Papiere Flächenmassen von  $m_B = 80 \text{ g/m}^2$  gewählt. Die Stoffwerte und Eingangsdaten der Bedruckstoffe sind in Tabelle 6.1 zusammengefaßt.

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Naturpapier	Gestr. Papier
Flächenmasse	$m_B$	$\text{kg/m}^2$	0,08	0,08
Dichte, trocken	$\rho_B$	$\text{kg/m}^3$	740	1250
Dichte, feucht	$\rho_{B,f}$	$\text{kg/m}^3$	800	1300
Papierdicke	$s_B$	$\mu\text{m}$	100	62
Monomol. Beladung	$X_{mono}$	$\text{kg/kg}$	0,069	0,044
Bindungsenthalpie	$h_{B,W}$	$\text{kJ/kmol}$	10000	10000
Porosität	$\varepsilon$		0,46	0,08
Wegfaktor	$\mu_{B,D}$		3	5
Anfangsbeladung	$X_0$	$\text{kg/kg}$	0,11	0,071

Tabelle 6.1: Stoffwerte und Eingangsdaten der untersuchten Papiere

## 6.1 Relevante Größen über der Papierdicke

Das im Kap. 4 beschriebene Berechnungsverfahren liefert zu bestimmten vorgewählten Zeitpunkten Profile der Bahntemperatur, des Wasserdampfpartialdruckes und der Feuchtebeladung über der Papierdicke.

### 6.1.1 Bahntemperatur

Die Bilder 6.1 und 6.2 zeigen die Bahntemperaturen über der dimensionslosen Papierdicke ( $z/s_B$ ) bei verschiedenen Trocknerverweilzeiten für Naturpapier und gestrichenes Papier. Um die Temperaturunterschiede innerhalb der Bedruckstoffe zu verdeutlichen, werden die Verläufe für  $t = 0,2, 0,3$  und  $0,4$  s gesondert dargestellt (Bild 6.3). Folgende Schlüsse lassen sich ableiten:

1. Bei gleichmäßiger beidseitiger Wärmezufuhr, wie sie in der Regel bei der Rollenoffsettrocknung vorliegt, stellen sich im Papier lediglich geringe Temperaturgradienten ein. Im vorliegenden Rechenbeispiel liegen die Temperaturdifferenzen zwischen Papierrand und -mitte im Naturpapier im Bereich  $t < 1$  s bei  $\Delta\vartheta = 2$  bis  $2,4$  °C und im gestrichenen Papier zwischen  $\Delta\vartheta = 0,6$  und  $1$  °C. Mit zunehmender Verweilzeit werden diese Differenzen kleiner.

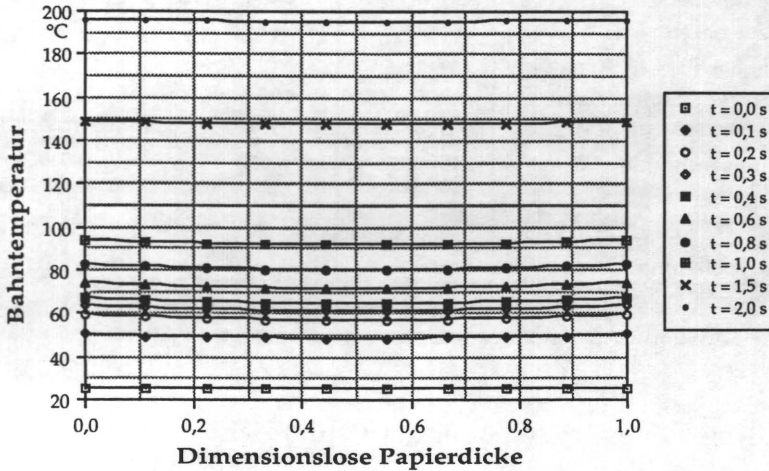


Bild 6.1: Naturpapier: Temperaturprofile über der dimensionslosen Dicke nach verschiedenen Trocknerverweilzeiten, ( $\vartheta_{\infty} = 240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

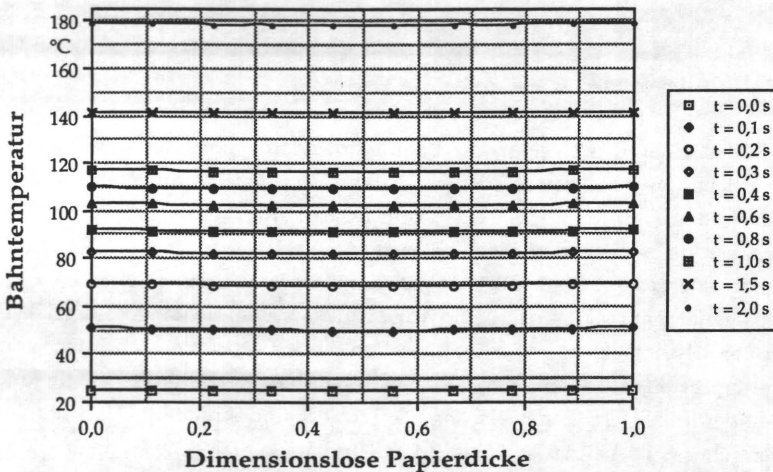


Bild 6.2: Gestrichenes Papier: Temperaturprofile über der dimensionslosen Dicke nach verschiedenen Trocknerverweilzeiten, ( $\vartheta_{\infty} = 240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

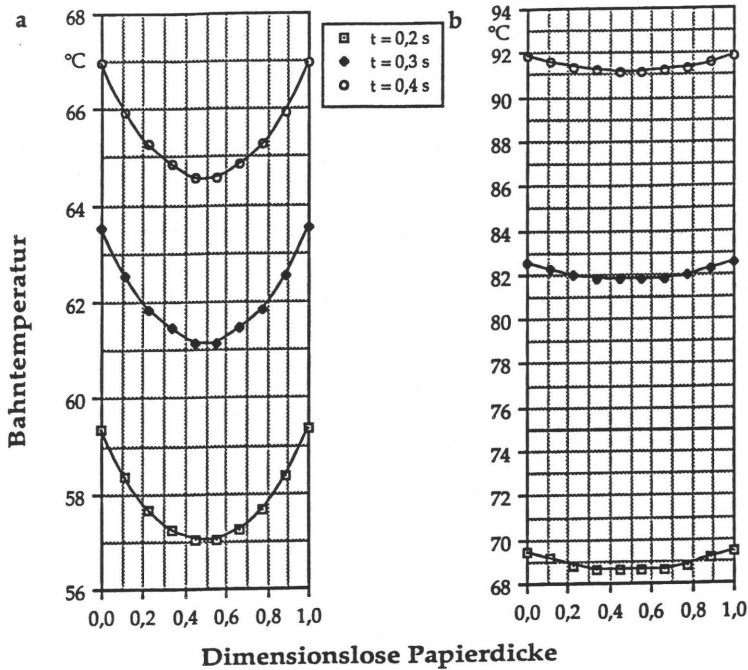


Bild 6.3: Temperaturprofile über der dimensionslosen Dicke für Naturpapier (a) und gestrichenes Papier (b) nach verschiedenen Trocknerverweilzeiten, ( $\vartheta_{\infty} = 240$  °C)

2. Das Naturpapier erwärmt sich zunächst langsamer als das gestrichene (vgl.  $t = 1$  s), während nach längeren Verweilzeiten ( $t = 1,5$  und  $2$  s) die Bahntemperaturen des Naturpapiers über denen des gestrichenen liegen.

### 6.1.2 Wasserdampfpartialdruck

Anhand der in den Bildern 6.4 und 6.5 dargestellten Wasserdampfpartialdrücke über der dimensionslosen Papierdicke lassen sich folgende Feststellungen treffen:

1. Die maximal auftretenden Wasserdampfpartialdrücke sind im gestrichenen Papier insbesondere aufgrund des größeren Diffusionswiderstandes wesentlich höher (im vorliegenden Beispiel Faktor 5) als im Naturpapier.



2. Der Dampfpartialdruck im Naturpapier (Bild 6.4) erreicht bereits nach  $t = 0,3$  s seinen Maximalwert, der bis  $t = 0,4$  s nahezu gleich bleibt und danach wieder abnimmt. Zu den genannten Zeitpunkten treten auch die größten Gradienten über der Papierdicke auf. Mit zunehmender Verweilzeit ( $t = 1,5$  und  $2$  s) herrscht über die gesamte Bedruckstoffdicke ein nahezu gleicher Dampfpartialdruck, der nach  $t = 2$  s demjenigen der Trockneratmosphäre entspricht. D. h., es findet keine weitere Wasserdampfdiffusion statt.
3. Im gestrichenen Papier wird der maximale Wasserdampfpartialdruck nach  $t = 0,6$  s erreicht (Bild 6.5). Dabei lassen sich Werte von  $p_{WD} > 80$  kPa feststellen, die sich bis  $t = 1$  s nur geringfügig verringern. Durch weitere Erhöhung des Diffusionswiderstands (z. B. durch einen beidseitigen Druckfarbenauftrag) kann der Dampfdruck den Umgebungsdruck annehmen und zu der in Kap. 2 angesprochenen "Blasenbildung" im Papier führen. Im Gegensatz zum Naturpapier treten auch nach Verweilzeiten von  $t = 1,5$  und  $2$  s sichtliche Gradienten und folglich auch Wasserdampfdiffusion auf.

### 6.1.3 Wasserbeladung

Die Wasserbeladung nach der Trocknung ist eine entscheidende Größe für die Weiterverarbeitung und die Druckqualität. In den Bildern 6.6 und 6.7 ist die auf die Anfangsbeladung  $X_0$  bezogene Wasserbeladung  $X$  über der Papierdicke dargestellt. Dazu lassen sich folgende Aussagen treffen:

1. Trotz der geringeren Partialdampfdrücke nimmt die Wasserbeladung im Naturpapier schneller ab als im gestrichenen.
2. Das gestrichene Papier weist die größeren Gradienten auf.
3. Bei Trocknungsbeginn ist die Wasserdampfpartialdichte  $\rho_{WD\infty}$  und somit auch der -partialdruck im Trocknungsmedium  $p_{WD\infty}$  höher als im Papier. Dadurch diffundiert (insbesondere beim Naturpapier) zunächst Wasserdampf in das Papier hinein und wird dort adsorbiert. Die Wasserbeladung steigt geringfügig an (siehe Bild 6.6,  $t = 0,05$  s).
4. Beim gestrichenen Papier läßt sich erst nach  $t = 0,4$  s in der Bedruckstoffmitte eine Änderung des Anfangsfeuchtegehalts feststellen.
5. Nach  $t = 1,5$  s hat das Naturpapier nahezu seine gesamte Feuchte abgegeben, während das gestrichene Papier diesen Zustand erst nach  $t > 2$  s erreicht.



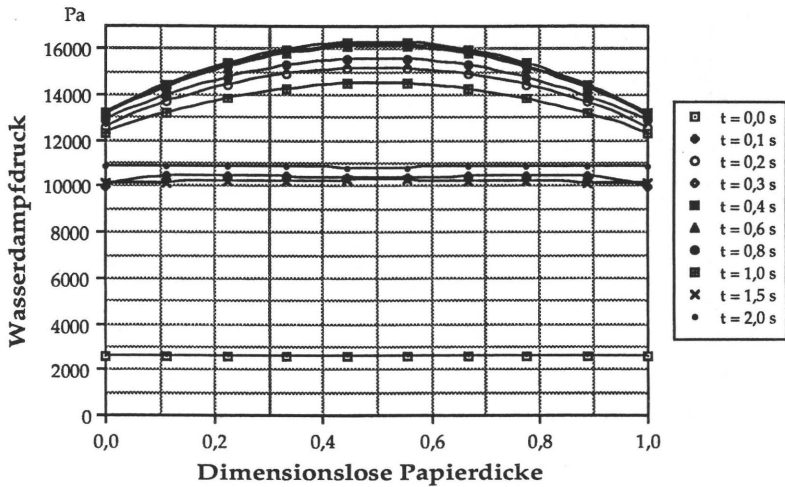


Bild 6.4: Naturpapier: Partialdruckprofile des Wasserdampfs über der dimensionslosen Dicke nach verschiedenen Trocknerverweilzeiten, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

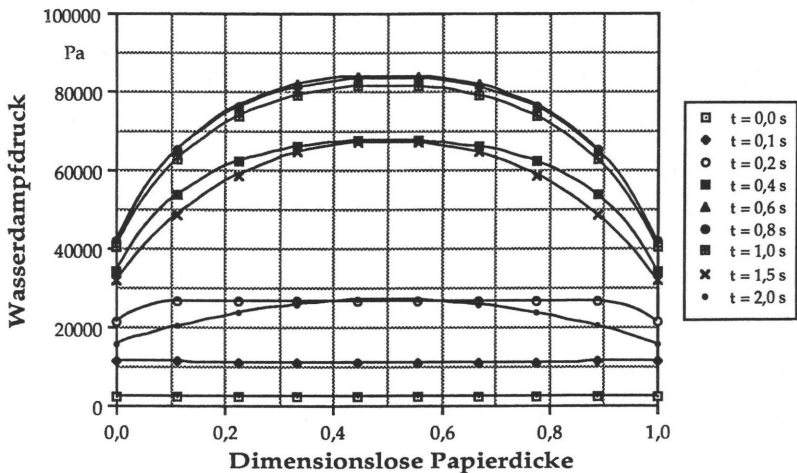


Bild 6.5: Gestrichenes Papier: Partialdruckprofile des Wasserdampfs über der dimensionslosen Dicke nach verschiedenen Trocknerverweilzeiten, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

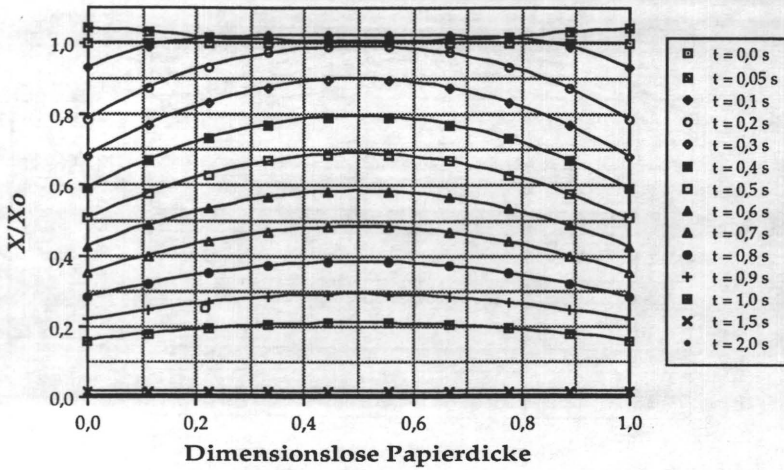


Bild 6.6: Naturpapier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der dimensionslosen Dicke nach verschiedenen Trocknerverweilzeiten, ( $\vartheta_\infty = 240^\circ \text{C}$ )

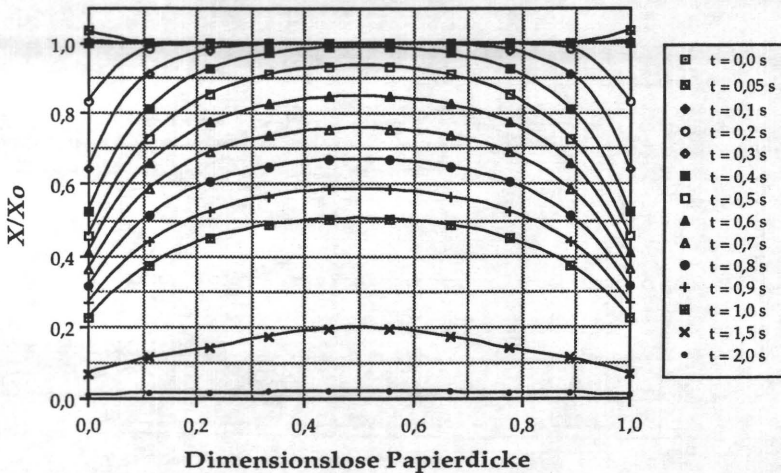


Bild 6.7: Gestrichenes Papier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der dimensionslosen Dicke nach verschiedenen Trocknerverweilzeiten, ( $\vartheta_\infty = 240^\circ \text{C}$ )

Die Bilder 6.1 bis 6.7 geben einen guten Aufschluß über den Verlauf der Trocknung bei einzelnen ausgewählten Betriebszuständen und Papierarten. Eine Bewertung bzw. ein Vergleich der Einflußparameter ist damit nur begrenzt möglich, da durch die Vielzahl von Daten und Kurvenverläufen unübersichtliche Diagramme entstehen. Um die Zielgrößen vorteilhafter darzustellen, werden im folgenden anstatt der in diesem Abschnitt gezeigten Profile über der Papierdicke gemittelte Werte von Temperatur und Feuchtebeladung aufgetragen.

## 6.2 Papierfeuchte und -temperatur während und nach der Trocknung

Die folgenden Untersuchungen werden auf die Temperatur und die Wasserbeladung des Papiers beschränkt, da diese für die Produktweiterverarbeitung und die -qualität entscheidend sind. Um den Einfluß der einzelnen Parameter auf die Zielgrößen zu verdeutlichen, wird zunächst von konstanten Randbedingungen ausgegangen, was dem Betrieb eines "Einzonentrockners" entspricht.

### 6.2.1 Einfluß der Trocknerverweilzeit

Die Verläufe von Bahntemperatur und -feuchte über der Trocknerverweilzeit geben Aufschluß über den Trocknungsverlauf. Zudem lassen sich Bahnzustände am Trockneraustritt nach bestimmten Verweilzeiten ablesen.

Bild 6.8 zeigt die mittleren Bahntemperaturen der beiden Papierarten. Die Eingangsgrößen dieses Rechenbeispiels entsprechen denen aus Kap. 6.1.

Bis  $t = 1,4$  s liegt die Temperatur des Naturpapiers unter der des gestrichenen. Die Ursache hierfür wird bei Betrachtung von Bild 6.9, das die auf die Anfangsfeuchte  $X_0$  bezogene Wasserbeladung  $X$  über der Trocknerverweilzeit darstellt, deutlich. Der größere Diffusionskoeffizient im Naturpapier (vgl. Bilder 5.5 und 5.6) hat zur Folge, daß die enthaltene Feuchte während der Trocknung schneller ausgetrieben wird. Die dafür benötigte Desorptionsenergie bewirkt die langsamere Erwärmung des Bedruckstoffes. Nachdem nahezu die gesamte Feuchte entwichen ist ( $t \approx 1,4$  s), steigt die Temperatur des Naturpapiers über die des gestrichenen, das nach  $t \approx 2$  s ebenfalls weitgehend ausgetrocknet ist. Mit

weiter zunehmender Verweildauer streben die Temperaturen der Bahn gegen die der Trocknungsluft.

Anhand des Bildes 6.9 lassen sich bereits Aussagen zum geschwindigkeitsbestimmenden Transportmechanismus für die Feuchtereduzierung im Papier ableiten. Dazu werden die BIOT-Kennzahlen  $Bi = 2 \alpha^* s_B / \lambda_B$  für den Wärmetransport und  $Bi^* = 2 \beta^* s_B / D_{WL}$  für den Stofftransport gebildet (Faktor 2 wegen der beidseitig installierten Trocknerdüsen). Die BIOT-Kennzahlen geben das Verhältnis der Transportwiderstände innerhalb des Papiers zu den äußeren Transportwiderständen an. Einsetzen der entsprechenden Werte für das vorliegende Rechenbeispiel ( $\alpha^* = 80 \text{ W/m K}$ ,  $\beta^* = 0,1 \text{ m/s}$ ,  $s_{B,NP} = 10^{-4} \text{ m}$ ,  $s_{B,GP} = 0,62 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ ,  $\lambda_{B,NP} = 0,14 \text{ W/m K}$ ,  $\lambda_{B,GP} = 0,169 \text{ W/m K}$ ,  $D_{WL,NP} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{WL,GP} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ) liefert für den Wärmetransport  $Bi_{NP} = 0,11$  sowie  $Bi_{GP} = 0,06$  und für den Stofftransport  $Bi^*_{NP} = 4$  sowie  $Bi^*_{GP} = 248$ . Damit liegen die entscheidenden Transportwiderstände für den Wärmetransport beim äußeren Wärmeübergang zwischen Umgebungsmedium und Papier und für den Stofftransport bei der Diffusion im Papier. D. h., daß die wesentlichen Transportmechanismen der Stofftransport in den Poren und der äußere Wärmeübergang sind (wobei nach /4.3/, S. 109 keiner von beiden allein geschwindigkeitsbestimmend ist).

Wie Bild 6.9 zeigt, stehen die Trocknerverweilzeiten für gleiche bezogene Restfeuchtebeladung etwa in einem Verhältnis von 1,4 bis 1,5 (z. B.  $X/X_0 = 0,43$ ,  $t_{NP} = 1 \text{ s}$ ,  $t_{GP} = 0,7 \text{ s}$ ,  $t_{NP}/t_{GP} = 1,43$ ), obwohl das Verhältnis der äquivalenten Diffusionskoeffizienten  $D_{WL,NP}/D_{WL,GP} \approx 100$  beträgt (vgl. Bilder 5.5 und 5.6). Dieser geringe Einfluß der Diffusion in den Papierporen läßt den Schluß zu, daß für den hier behandelten Trocknungsprozeß primär die Wärmeübertragung von der Trocknerumgebung zum Papier geschwindigkeitsbestimmend ist. Diese Wärmeübertragung ist von der Temperaturdifferenz zwischen Trocknungsmedium und Papierbahn und damit von der Trocknungslufttemperatur sowie vom Wärmeübergangskoeffizienten abhängig (vgl. Gl. (4.107)). Der Einfluß der beiden letztgenannten Größen auf die Papierfeuchtereduzierung wird in den Kap. 6.2.2 und 6.2.5 gezeigt.

Bild 6.10 zeigt ergänzend die Zeitableitungen der Feuchtebeladungen bzw. die Trocknungsgeschwindigkeiten über der Trocknerverweilzeit. Das Naturpapier weist zunächst eine große (negative) Steigung auf und erreicht bereits nach

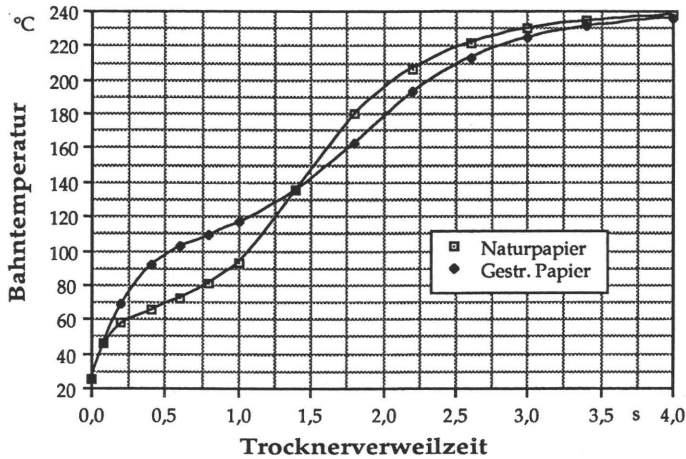


Bild 6.8: Bahnentemperatur über der Trocknerverweilzeit für Naturpapier und gestrichenes Papier, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

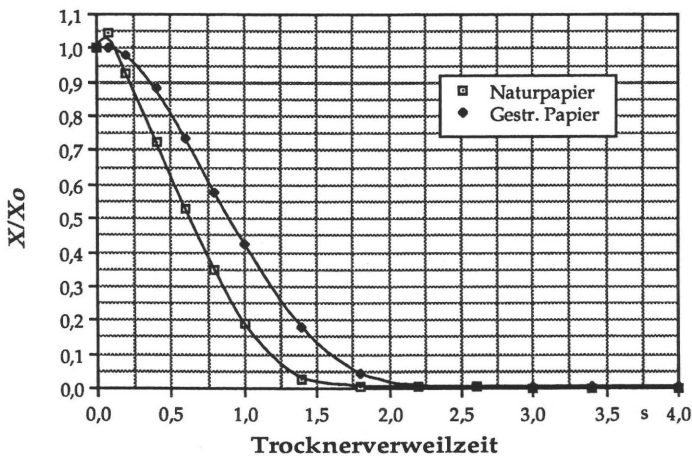


Bild 6.9: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Trocknerverweilzeit für Naturpapier und gestrichenes Papier, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

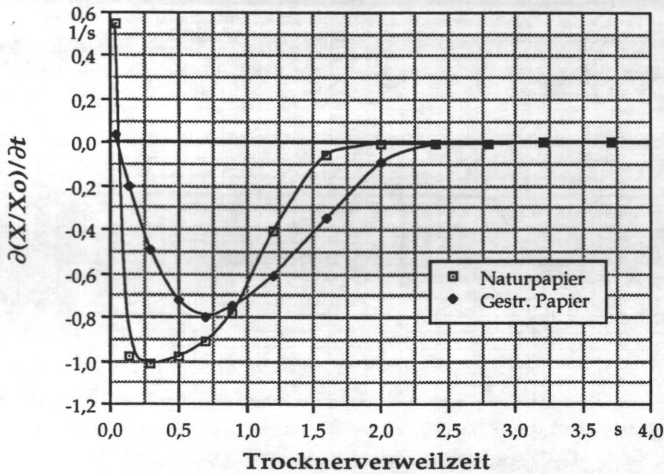


Bild 6.10: Zeitableitung der auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Trocknerverweilzeit für Naturpapier und gestrichenes Papier, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

$t \approx 0,3$  s die max. Trocknungsgeschwindigkeit. Beim gestrichenen Papier ist die Zunahme wie auch der nach  $t \approx 0,6$  s auftretende Maximalbetrag geringer. Ein Vergleich mit den Bildern 6.4 und 6.5 zeigt den direkten Zusammenhang der jeweiligen max. Trocknungsgeschwindigkeit mit den Profilen der entsprechenden Wasserdampfpartialdrücke.

## 6.2.2 Einfluß der Trocknungslufttemperatur

In den folgenden Kapiteln 6.2.2 bis 6.2.6 wird der Einfluß weiterer wichtiger Parameter auf Bahntemperatur und -feuchtegehalt untersucht. Zum einen interessieren die Verläufe über der Trocknerverweilzeit, die für die Verdunstung der Mineralöle aus den Druckfarben bestimmend sind, und zum anderen die für die Weiterverarbeitung und Qualität der Produkte maßgeblichen Bahnendzustände am Trockneraustritt.

Aus Gründen der Übersicht erfolgt für die zwei Papierarten eine getrennte Darstellung der relevanten Größen über der Trocknerverweilzeit (hier Bilder 6.11 bis 6.14).

Für eine vergleichende Bewertung beider Bedruckstoffe werden die Endzustände bezüglich Temperatur und Wasserbeladung über der jeweils untersuchten Einflußgröße nach der bei der Rollenoffsettrocknung angestrebten Verweilzeit von  $t = 1$  s aufgetragen (hier Bilder 6.17 und 6.18).

Bild 6.11 zeigt die Bahntemperaturen des Naturpapiers im Trockner bei Trocknungslufttemperaturen von  $\vartheta_{\infty} = 100, 200$  und  $300$  °C. Bei der Bewertung dieser Verläufe ist zu beachten, daß die Mineralölverdunstung bei der vorausgesetzten Partialdichte im Trockner von  $\rho_{MD\infty} = 0,003$  kg/m<sup>3</sup> (vgl. Kap. 5.5) erst ab Temperaturen von  $\vartheta > 60$  °C einsetzt (vgl. Bild 5.9).

Eine Lufttemperatur von  $\vartheta_{\infty} = 300$  °C erfordert beim Naturpapier eine Verweilzeit von  $t = 1$  s, um eine beidseitig einschichtig aufgetragene Farbe mit  $1$  µm Dicke ausreichend zu trocknen (siehe Kap. 5.5). Soll die gleiche Mineralölmenge bei  $\vartheta_{\infty} = 200$  °C ausgetrieben werden, ist die Verweilzeit auf  $t = 1,67$  s zu erhöhen. Die Bahnendtemperatur wird durch diese "schonendere" Betriebsweise von  $125$  auf  $120$  °C gesenkt. Dagegen sind die Endfeuchtebeladungen mit  $4$  bis  $5$  % der Anfangsbeladung nahezu gleich (Bild 6.12).

Die Temperatur des gestrichenen Papiers (Bild 6.13) steigt zu Beginn der Trocknung infolge des geringeren Feuchteverlusts schneller an als die des Naturpapiers. Mit  $\vartheta_{\infty} = 300$  °C werden bereits nach  $t = 0,2$  s und mit  $\vartheta_{\infty} = 200$  °C nach  $t = 0,4$  s Bahntemperaturen von  $\vartheta_B = 80$  °C erreicht.

Gestrichene Papiere werden häufig für hochwertige Produkte, die in der Regel höhere Druckfarbenbelegungen aufweisen, verwendet. Es wird von einer Druckfarbensicht von  $1,5$  µm Dicke ausgegangen.

Tabelle 6.2 zeigt für verschiedene Trocknungslufttemperaturen die erforderlichen Verweilzeiten für eine ausreichende Farbtrocknung und die sich ergebenden Bahnendtemperaturen und -feuchtebeladungen.

Während die Bahnendfeuchte in allen drei Fällen nahezu gleich ist, nehmen die Bahnendtemperaturen trotz zunehmender Verweilzeit mit niedrigeren Trocknungslufttemperaturen ab.

Mit  $\vartheta_{\infty} = 100$  °C betragen die Bahntemperaturen nach  $t = 2$  s beim Naturpapier  $60$  °C und beim gestrichenen  $80$  °C, was für eine praxisgerechte Rollenoffsettrocknung nicht ausreicht.



$\vartheta_{\infty}$ [°C]	$t_1$ [s]	$\vartheta_{B1}$ [°C]	$X_1/X_0$
200	1,22	112,3	0,430
240	1,00	116,5	0,427
300	0,80	119,8	0,425

Tabelle 6.2: Gestrichenes Papier: Zur ausreichenden Druckfarbentrocknung erforderliche Trocknerverweilzeiten (berechnet nach Kap. 5.5) mit Bahntemperaturen und -feuchtebeladungen für verschiedene Temperaturen der Trocknungsluft

Mit Hilfe der Bilder 6.11 bis 6.14 läßt sich der in Kap. 6.2.1 angesprochene geschwindigkeitsbestimmende Einfluß der Trocknungslufttemperatur für die Bahntemperatur und die Papierfeuchtereduzierung zeigen. Dazu werden bei gleichen Bahntemperaturen (siehe Bilder 6.11 und 6.13) und gleichen bezogenen Wasserbeladungen (siehe Bilder 6.12 und 6.14) die zu den untersuchten Trocknungslufttemperaturen gehörigen Verweilzeiten im Trockner bestimmt bzw. abgelesen. Die Zunahme der Bahntemperatur  $\Delta\vartheta(t) = \vartheta(t) - \vartheta_0$  und die Abnahme der Beladung  $\Delta X(t)/X_0 = 1 - X(t)/X_0$  werden durch die zuvor bestimmten Verweilzeiten  $t$  dividiert, wodurch sich mittlere Geschwindigkeiten der Bahntemperaturzunahme  $\Delta\vartheta(t)/t$  und mittlere Trocknungsgeschwindigkeiten  $(\Delta X(t)/X_0)/t$  ergeben. Damit lassen sich die Zusammenhänge zwischen den genannten Geschwindigkeiten und der Trocknungslufttemperatur für beide Papiersorten in Diagrammen auftragen und bewerten (siehe Bilder 6.15 und 6.16).

Zunächst wird die Geschwindigkeit der Bahntemperaturzunahme  $\Delta\vartheta/t$  betrachtet (Bild 6.15), wobei von einer Bahntemperatur von  $\vartheta = 100$  °C ausgegangen wird (vgl. Bilder 6.11 und 6.13). Dies entspricht einer Temperaturzunahme von  $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0 = 100$  °C - 25 °C = 75 °C. Wegen der hier gewählten Bahntemperatur  $\vartheta = 100$  °C ergibt sich in Bild 6.15 für beide Papiersorten ein zusätzliches Wertepaar ( $\vartheta_{\infty} = 100$  °C,  $\Delta\vartheta/t = 0$ ), da Bahntemperaturen von  $\vartheta \geq 100$  °C nur durch Trocknungslufttemperaturen von  $\vartheta_{\infty} > 100$  °C erreicht werden können. Es zeigt sich bei beiden Papiersorten ein annähernd linearer Anstieg der Geschwindigkeit der Bahntemperaturzunahme  $\Delta\vartheta/t$  über der Trocknungslufttemperatur  $\vartheta_{\infty}$ , wobei die Werte beim gestrichenen Papier nahezu doppelt so groß sind wie beim Naturpapier (z. B. Naturpapier:  $\Delta\vartheta/t$  ( $\vartheta_{\infty} = 200$  °C) = 0,5 °C/s, gestr. Papier:  $\Delta\vartheta/t$  ( $\vartheta_{\infty} = 200$  °C) = 0,94 °C/s).



Bild 6.16 zeigt die mittleren Trocknungsgeschwindigkeiten  $(\Delta X/X_0)/t$  in Abhängigkeit der Trocknungslufttemperatur für  $\Delta X/X_0 = 1 - X/X_0 = 1 - 0,5 = 0,5$  (vgl. Bilder 6.12 und 6.14). Auch hierbei läßt sich bei beiden Papiersorten ein annähernd linearer Anstieg der Trocknungsgeschwindigkeit über der Trocknungslufttemperatur feststellen. Die Werte für das Naturpapier liegen um einen Faktor 1,42 höher als diejenigen für das gestrichene Papier.

Die hier dargestellten Zusammenhänge belegen den geschwindigkeitsbestimmenden Einfluß der Trocknungslufttemperatur auf die relevanten Größen Bahntemperatur und Papierfeuchtebelastung. Dagegen spielt der Stofftransport in den Papierporen (wie in Kap. 6.2.1 bereits angesprochen) eine erheblich kleinere Rolle. Obwohl sich die äquivalenten Diffusionskoeffizienten in den beiden Papiersorten um einen Faktor  $D_{WL,NP}/D_{WL,GP} \approx 100$  unterscheiden (vgl. Bilder 5.5 und 5.6), beträgt das Verhältnis der Trocknungsgeschwindigkeiten lediglich  $[(\Delta X/X_0)/t]_{NP}/[(\Delta X/X_0)/t]_{GP} = 1,42$  und das der Geschwindigkeiten der Bahntemperaturzunahme  $(\Delta \vartheta/t)_{NP}/(\Delta \vartheta/t)_{GP} \approx 0,5$ .

Die Bahnendzustände nach  $t = 1$  s zeigen den starken Einfluß der Desorption. Die Bahnendtemperaturen (Bild 6.17) und -feuchtebelastungen (Bild 6.18) des gestrichenen Papiers liegen bei mittleren Trocknungslufttemperaturen erheblich höher als die des Naturpapiers (z. B.  $\vartheta_\infty = 200$  °C:  $\Delta \vartheta_B = 29$  °C,  $\Delta(X/X_0) = 25$  %). Bei hohen Trocknungslufttemperaturen strebt die Bahnendfeuchtebelastung des Naturpapiers gegen 0, wodurch die Bahntemperatur (ab  $\vartheta_\infty > 315$  °C) über die des gestrichenen Papiers ansteigt.

### 6.2.3 Einfluß der flächenbezogenen Masse bzw. der Dicke des Papiers

Bei gegebener Dichte wächst die flächenbezogene Masse proportional zur Papierdicke ( $m_B = \rho_B \cdot s_B$ ).

Im folgenden werden flächenbezogene Massen von  $m_B = 50, 100$  und  $150$  g/m<sup>2</sup> verglichen.

Beim Naturpapier liegen die Bahntemperaturen während der Trocknung trotz der unterschiedlichen Flächenmassen zunächst nahe beieinander (Bild 6.19). Dies deutet darauf hin, daß der Großteil der zugeführten Wärme zur Desorption des Wassers verbraucht wird und somit weniger Energie für die Bahnaufheizung zur

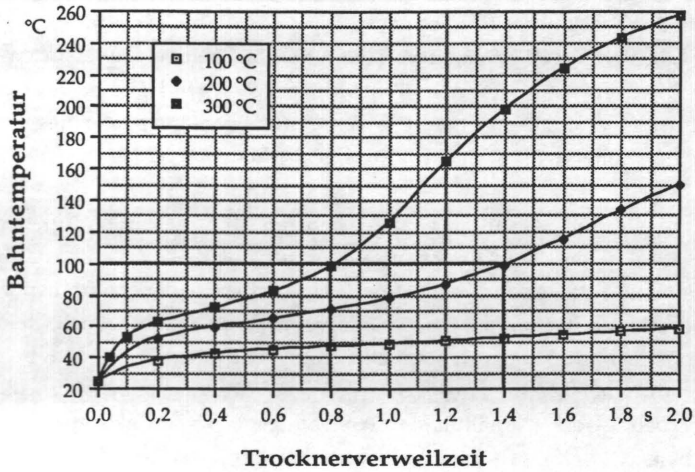


Bild 6.11: Naturpapier: Bahn­temperatur über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Trocknungslufttemperat­uren

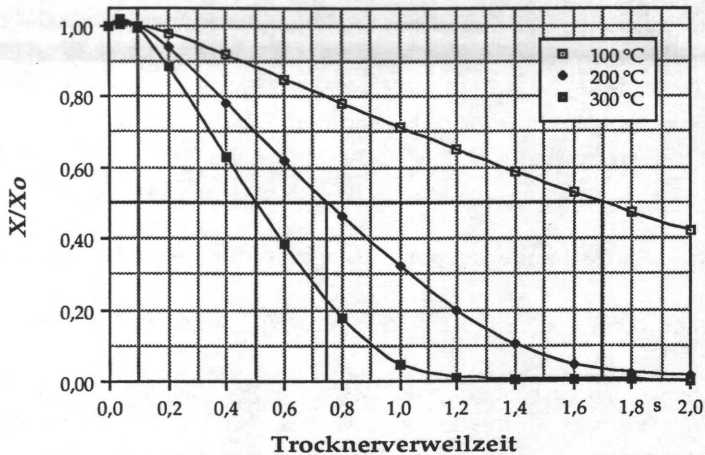


Bild 6.12: Naturpapier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbe­ladung über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Trock­nungslufttemperat­uren

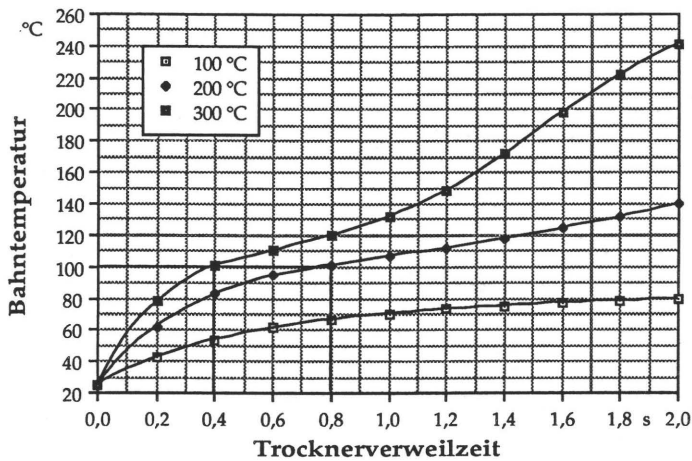


Bild 6.13: Gestrichenes Papier: Bahntemperatur über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Trocknungslufttemperaturen

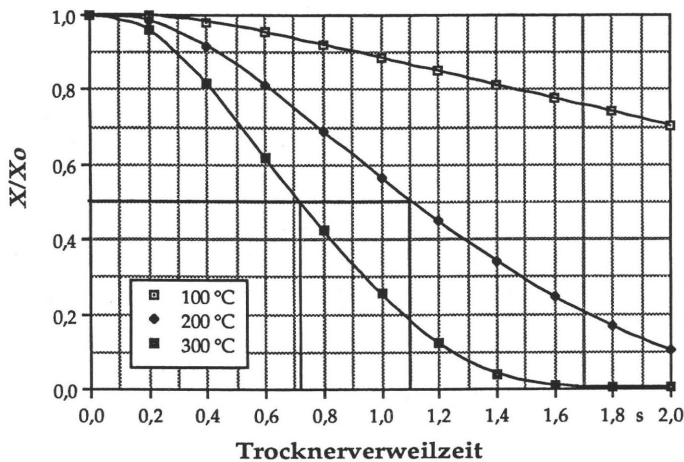


Bild 6.14: Gestrichenes Papier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Trocknungslufttemperaturen

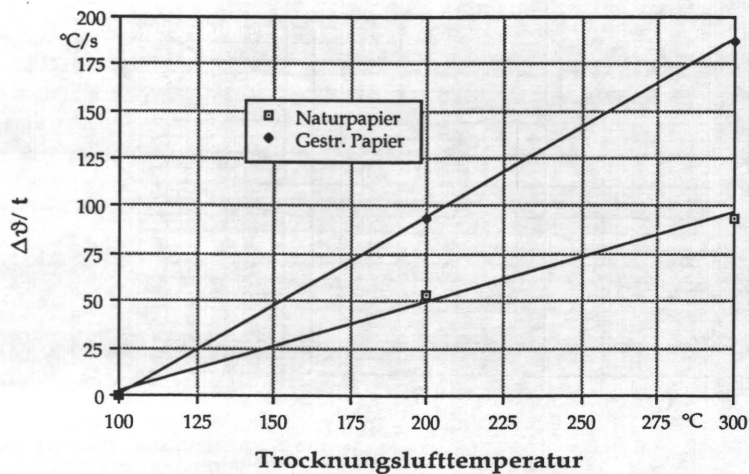


Bild 6.15: Mittlere Geschwindigkeit der Bahntemperaturzunahme in Abhängigkeit der Trocknungslufttemperatur für Naturpapier und gestrichenes Papier

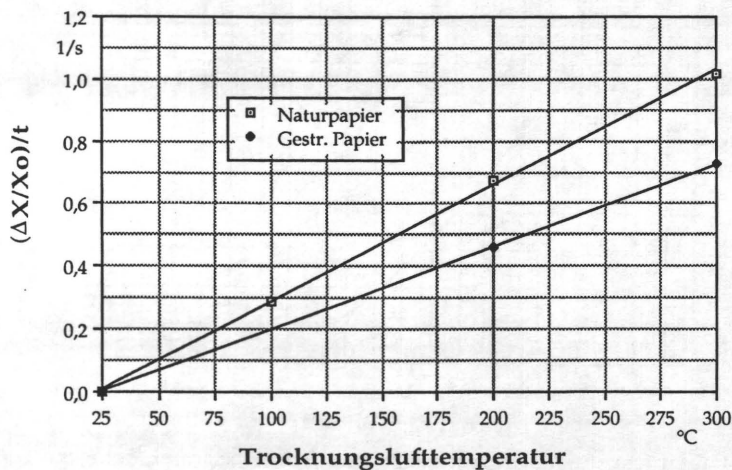


Bild 6.16: Mittlere Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Trocknungslufttemperatur für Naturpapier und gestrichenes Papier

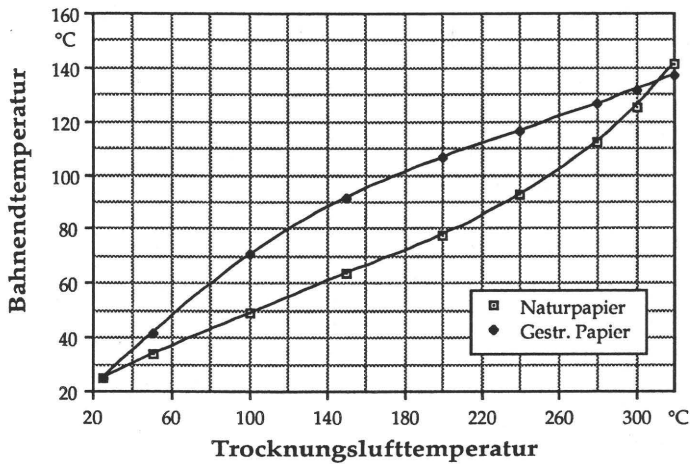


Bild 6.17: Bahntemperatur in Abhängigkeit der Trocknungslufttemperatur nach  $t = 1$  s für Naturpapier und gestrichenes Papier

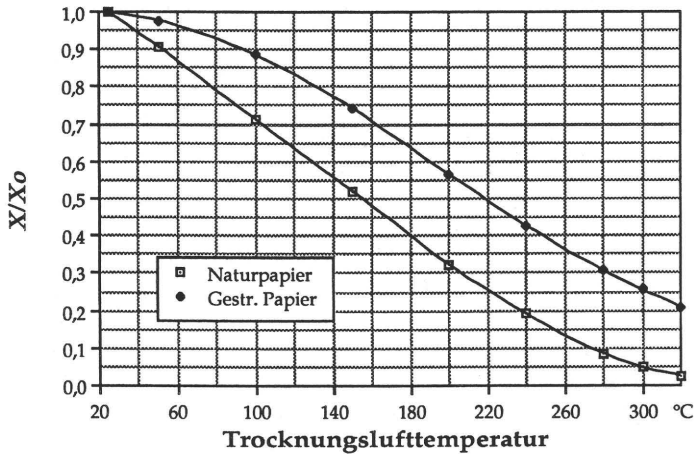


Bild 6.18: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung in Abhängigkeit der Trocknungslufttemperatur nach  $t = 1$  s für Naturpapier und gestrichenes Papier

Verfügung steht. Nachdem die Feuchtebeladungen auf etwa 30 bis 40 % ihres Anfangswertes reduziert sind (Bild 6.20), wird der Temperaturanstieg steiler.

Beim gestrichenen Papier sind bereits nach  $t = 0,2$  s deutliche Temperaturunterschiede (Bild 6.21) sichtbar. Die zugeführte Wärme dient zunächst überwiegend der Aufheizung des Bedruckstoffes, wodurch ein leichtes Papier höhere Temperaturen annimmt.

Während die Trocknungsgeschwindigkeit im weiteren Verlauf stark ansteigt, wird die Zunahme der Bahntemperatur zunächst geringer. Nachdem das leichte Papier den Großteil seiner Feuchte abgegeben hat (Bild 6.22), wird der Temperaturanstieg wieder steiler. Bei den beiden schwereren Bedruckstoffen findet während des gesamten betrachteten Zeitintervalls Desorption statt, wodurch die Temperaturen nahe beieinander liegen.

Bei Flächenmassen von  $m_B < 20$  g/m<sup>2</sup> nehmen beide Papiere nach  $t = 1$  s die Temperatur der Trocknungsluft an (Bild 6.23) und das enthaltene Wasser ist vollständig ausgetrieben (Bild 6.24). Ab  $m_B > 20$  g/m<sup>2</sup> fallen die Bahnendtemperaturen steil ab, und die Feuchtebeladungen nehmen deutlich zu. Bei Feuchtebeladungen von  $X/X_0 > 30$  % (Naturpapier:  $m_B \approx 80$  g/m<sup>2</sup>, gestrichenes Papier:  $m_B \approx 60$  g/m<sup>2</sup>) gehen die Bahnendtemperaturen in einen flach abfallenden Verlauf über. So sinkt beispielsweise die Bahnendtemperatur beim Naturpapier durch Erhöhung der Flächenmasse von  $m_B = 100$  g/m<sup>2</sup> auf  $m_B = 300$  g/m<sup>2</sup> lediglich von  $\vartheta_{B1} = 82$  °C auf 70 °C, während die Feuchtebeladung von  $X/X_0 = 33$  % auf 90 % steigt.

Im Bereich zwischen  $m_B = 100$  und 150 g/m<sup>2</sup> liegen die Temperaturen des gestrichenen Papiers bis zu 35 °C über denen des Naturpapiers. Die Hauptursache dafür liegt wiederum im größeren Feuchteverlust des Naturpapiers. Durch weitere Erhöhung der Flächenmasse nähern sich die jeweiligen Temperaturen wie auch die Feuchtebeladungen einander an.

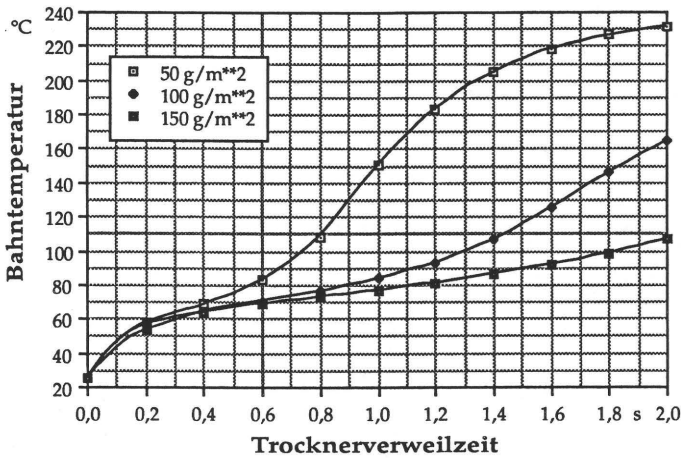


Bild 6.19: Naturpapier: Bahn­temperatur über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Flächenmassen, ( $\vartheta_{\infty} = 240\text{ °C}$ )

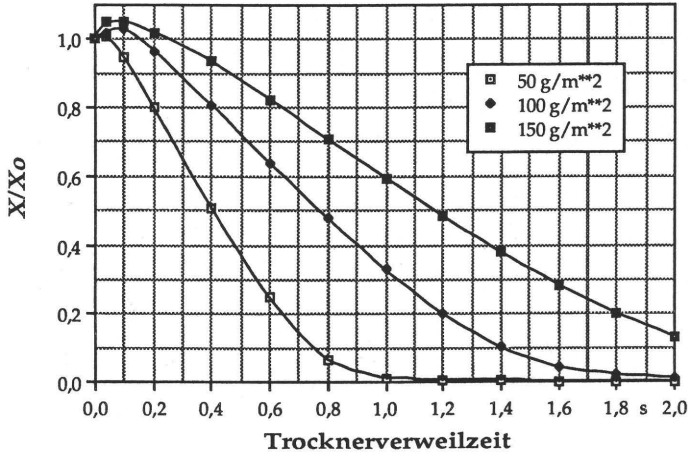


Bild 6.20: Naturpapier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Flächenmassen, ( $\vartheta_{\infty} = 240\text{ °C}$ )



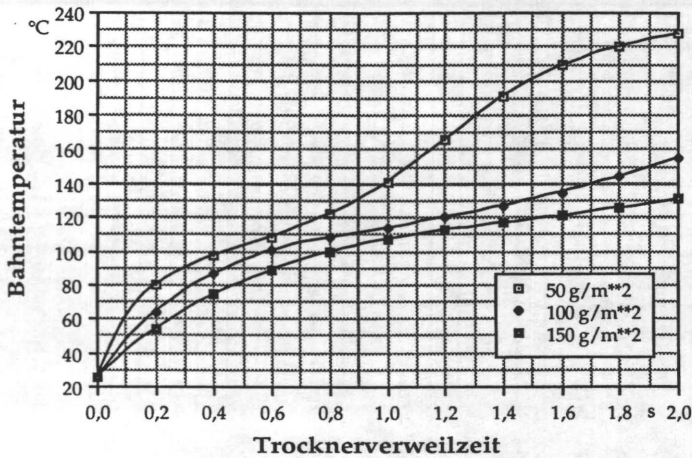


Bild 6.21: Gestrichenes Papier: Bahntemperaturen über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Flächenmassen, ( $\vartheta_{\infty} = 240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

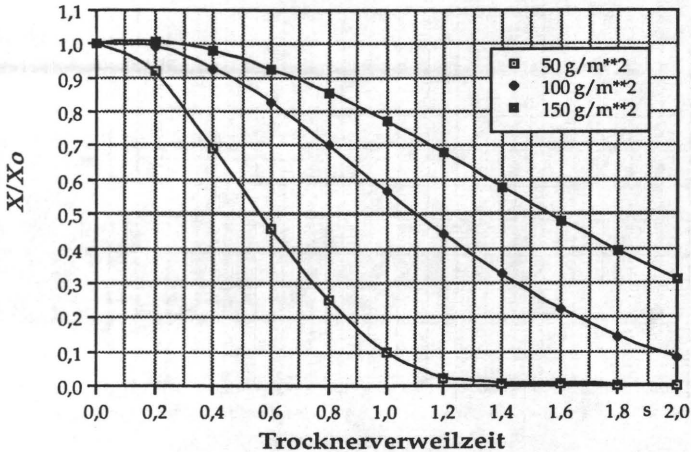


Bild 6.22: Gestrichenes Papier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Flächenmassen, ( $\vartheta_{\infty} = 240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )



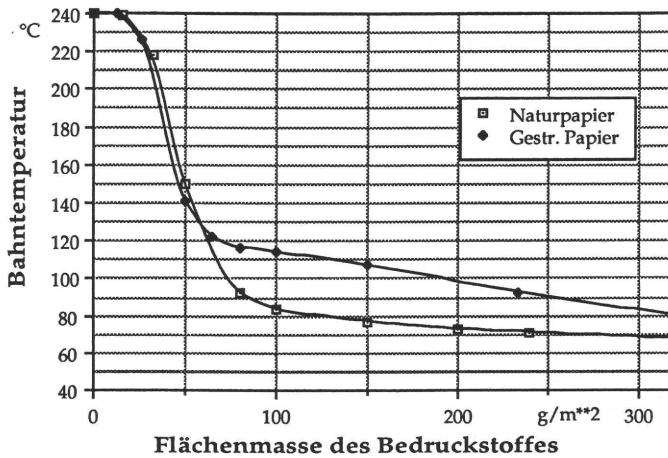


Bild 6.23: Bahntemperatur über der Flächenmasse von Naturpapier und gestrichenem Papier nach  $t = 1$  s, ( $\vartheta_{\infty} = 240$  °C)

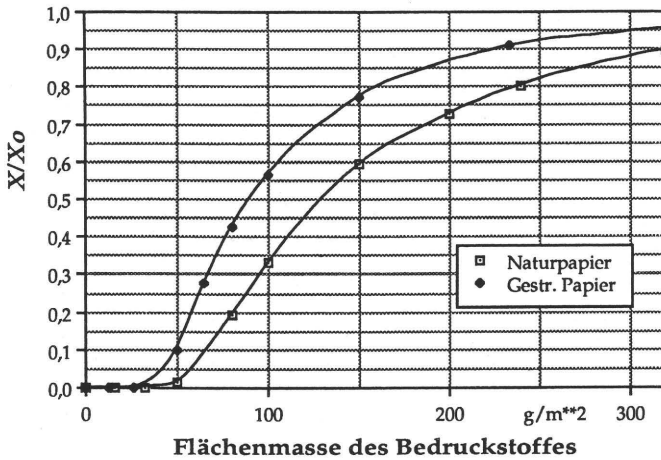


Bild 6.24: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Flächenmasse von Naturpapier und gestrichenem Papier nach  $t = 1$  s, ( $\vartheta_{\infty} = 240$  °C)

## 6.2.4 Einfluß der Anfangsfeuchtebeladung

Die im folgenden untersuchten Anfangsfeuchtebeladungen  $X_0$  sind in Tabelle 6.3 dargestellt.

	$X_{01}$	$X_{02}$	$X_{03}$
Naturpapier	0	0,07	0,124
Gestr. Papier	0	0,04	0,080

Tabelle 6.3: Anfangsfeuchtebeladungen

Die Bilder 6.25 und 6.26 verdeutlichen den entscheidenden Einfluß des adsorbierten Wassers auf die Bahntemperaturen während der Trocknung. Nach  $t = 0,8$  s ist beim Naturpapier mit einer Anfangsbeladung von  $X_0 = 0,07$  die Bahntemperatur um ca.  $\Delta\vartheta_B = 80$  °C und bei  $X_0 = 0,124$  um ca.  $\Delta\vartheta_B = 100$  °C gegenüber dem Bedruckstoff mit  $X_0 = 0$  reduziert.

Wegen der geringeren Desorptionsgeschwindigkeit betragen die maximalen Temperaturunterschiede im gestrichenen Papier  $\Delta\vartheta_B = 85$  °C und treten erst nach ca.  $t = 1,4$  s auf (Bild 6.27).

Für  $X_0 = 0$  sind die Temperaturverläufe für beide Papierarten trotz unterschiedlicher Wärmeleitkoeffizienten, Dicken und Dichten gleich.

Wie zu erwarten, trocknen beide Papierarten mit abnehmender Anfangsfeuchtebeladung schneller aus (Bilder 6.26 und 6.28).

Um einen Vergleich der Resultate zu ermöglichen, werden im folgenden die jeweiligen Beladungen auf  $X_{03} = X_{max}$  bezogen.

Mit wachsender Anfangsfeuchtebeladung reduzieren sich die Bahntemperaturen nach  $t = 1$  s erheblich (Bild 6.29).

Im Bereich  $0 < X_0/X_{max} < 0,4$  nimmt das Naturpapier die höheren Temperaturen an, während für  $X_0/X_{max} > 0,4$  das gestrichene Papier die höheren Werte aufweist.

Bei  $X_0/X_{max} > 0,7$  betragen die Temperaturunterschiede zwischen beiden Bedruckstoffen bis zu 25 °C und die Differenzen in der Endfeuchte bis zu 21 %.

Die Endfeuchtebelastung wächst mit zunehmender Anfangsfeuchtebelastung (Bild 6.30), wobei beim gestrichenen Papier ab  $X_0/X_{max} > 0,5$  und beim Naturpapier ab  $X_0/X_{max} > 0,8$  ein nahezu linearer Zusammenhang erkennbar ist. Die Restfeuchten des gestrichenen Papiers gehen für  $X_0/X_{max} < 0,1$  und die des Naturpapiers für  $X_0/X_{max} < 0,4$  gegen 0.

### 6.2.5 Einfluß der Luftaustrittsgeschwindigkeit an den Trocknerdüsen

Die Austrittsgeschwindigkeit der Luft an den Trocknerdüsen beeinflusst den Wärme- und den Stoffübergangskoeffizienten (vgl. Gl. (4.115 a, b)). Die diesbezüglichen Gleichungen gelten für  $Re > 1500$  (vgl. Kap. 4.7.2.3), was hier einer Luftgeschwindigkeit von  $w_D > 12$  m/s entspricht.

Eine wachsende Düsenaustrittsgeschwindigkeit bewirkt über den Wärmeübergangskoeffizienten ( $\alpha \sim w_D^{2/3}$ ), ähnlich wie eine vergrößerte Trocknungslufttemperatur, eine Erhöhung des zugeführten Wärmestroms (vgl. Gl. (4.107)). So sind die Temperaturen während der Trocknung für  $w_D = 100$  m/s (Bilder 6.31 und 6.33) und  $t < 1,6$  s nahezu identisch mit den in den Bildern 6.11 und 6.13 dargestellten Verläufen für  $\vartheta_\infty = 300$  °C.

In Kap. 6.2.1 wurde bereits auf den geschwindigkeitsbestimmenden Einfluß des Wärmeübergangskoeffizienten für den Trocknungsprozeß hingewiesen. Dies wird im folgenden analog zum Vorgehen bei den Trocknungslufttemperaturen (vgl. Kap. 6.2.2) gezeigt. Zwischen dem Wärmeübergangskoeffizienten und der Düsenaustrittsgeschwindigkeit besteht nach den Gleichungen (4.121) und (4.124) der Zusammenhang  $\alpha \sim w_D^{2/3}$ . Da hier der Einfluß des Wärmeübergangskoeffizienten untersucht werden soll, werden die Geschwindigkeit der Bahntemperaturzunahme (Bild 6.35) und die Trocknungsgeschwindigkeit (Bild 6.36) über  $w_D^{2/3}$  aufgetragen. Wie am Anfang dieses Kapitels erwähnt, gilt die Gleichung für den Wärmeübergangskoeffizienten für Düsenaustrittsgeschwindigkeiten von  $w_D > 12$  m/s. Aus diesem Grund beginnt die Darstellung der Größen in den Bildern 6.29 und 6.30 bei  $w_D^{2/3} = 5$  ( $\approx 12^{2/3}$ ).

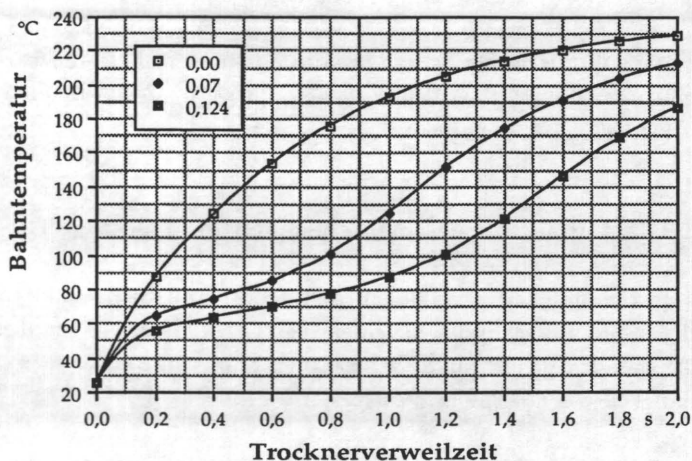


Bild 6.25: Naturpapier: Bahnentemperatur über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Anfangsfeuchtebeladungen, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

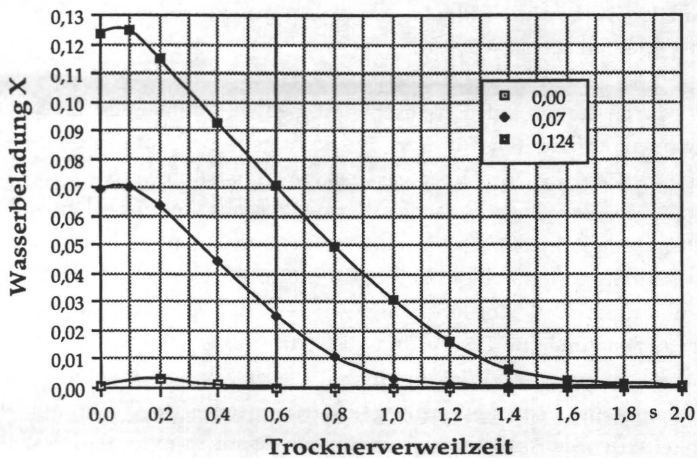


Bild 6.26: Naturpapier: Wasserbeladungen über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Anfangsfeuchtebeladungen, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

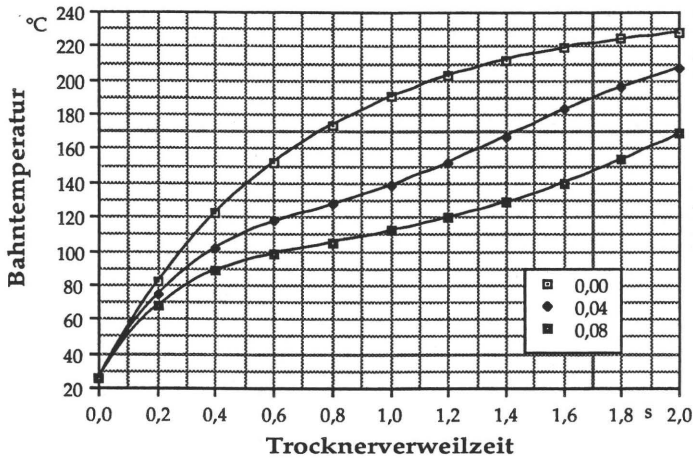


Bild 6.27: Gestrichenes Papier: Bahnentemperatur über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Anfangsfeuchtebeladungen, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

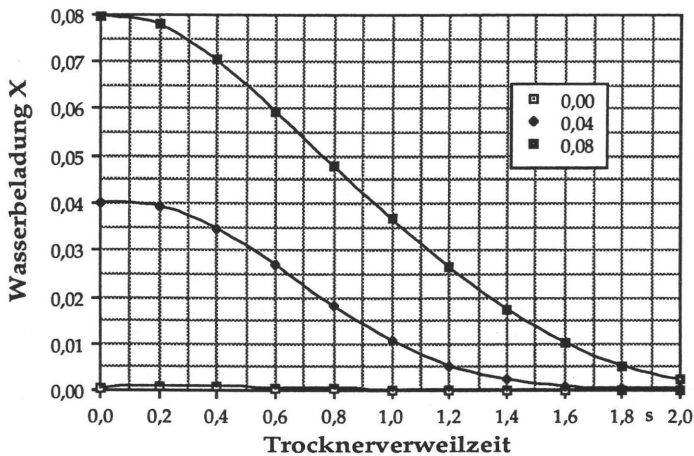


Bild 6.28: Gestrichenes Papier: Wasserbeladungen über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Anfangsfeuchtebeladungen, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

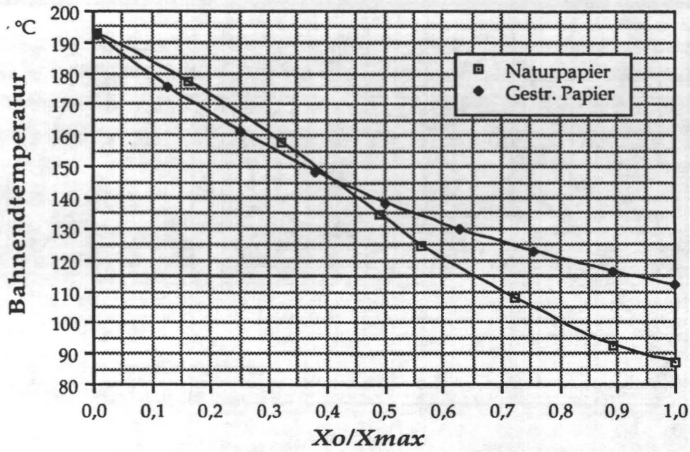


Bild 6.29: Bahnendtemperatur über der Anfangsfeuchtebeladung für Naturpapier und gestrichenes Papier nach  $t = 1$  s, ( $\vartheta_{\infty} = 240$  °C)

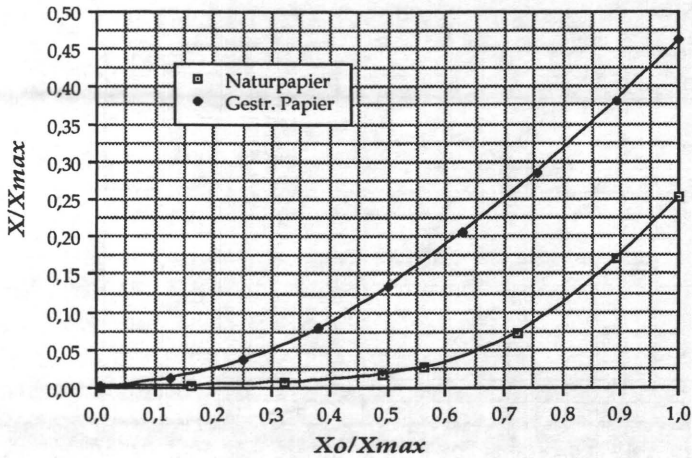


Bild 6.30: Auf die Maximalfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Anfangsfeuchtebeladung für Naturpapier und gestrichenes Papier nach  $t = 1$  s, ( $\vartheta_{\infty} = 240$  °C)

Wie in Kap. 6.2.2 wird eine Bahntemperatur von  $\vartheta = 100\text{ °C}$  und damit eine Bahntemperaturzunahme von  $\Delta\vartheta = 75\text{ °C}$  sowie eine Abnahme der bezogenen Feuchtebeladung von  $\Delta X/X_0 = 0,5$  gewählt. Die zugehörigen Trocknerverweilenzeiten werden den Bildern 6.31 bis 6.34 entnommen.

Die Resultate für die mittlere Geschwindigkeit der Bahntemperaturzunahme (Bild 6.35) und die Trocknungsgeschwindigkeit (Bild 6.36) in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten sind denen für die Trocknungslufttemperatur sehr ähnlich (vgl. Bilder 6.15 und 6.16).

Die mittleren Geschwindigkeiten steigen annähernd linear mit zunehmenden Wärmeübergangskoeffizienten. Während bei der Geschwindigkeit der Bahntemperaturzunahme die Werte des gestrichenen Papiers etwa doppelt so hoch sind wie die des Naturpapiers, ist die Trocknungsgeschwindigkeit beim Naturpapier um einen Faktor 1,42 größer als die des gestrichenen Papiers.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Trocknungslufttemperatur und der Wärmeübergangskoeffizient (und damit der Wärmeübergang vom Trocknungsmedium zum Papier) für die relevanten Zielgrößen Bahntemperatur und Feuchtebeladung geschwindigkeitsbestimmend sind. Wie die Bilder 6.15, 6.16, 6.35 und 6.36 zeigen, steigen die Geschwindigkeiten der Bahntemperaturzunahme und die Trocknungsgeschwindigkeiten direkt proportional zur Trocknungslufttemperatur und zum Wärmeübergangskoeffizienten.

Dagegen ist der zweite relevante Transportmechanismus - der Stofftransport im Papier (vgl. Kap. 6.2.1) - nur in geringem Maße geschwindigkeitsbestimmend. Obwohl der äquivalente Diffusionskoeffizient im Naturpapier etwa um einen Faktor 100 größer ist als im gestrichenen Papier (vgl. Bilder 5.5 und 5.6), nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit in den dargestellten Rechenbeispielen für das Naturpapier lediglich den 1,4- bis 1,5-fachen Wert des gestrichenen Papiers an (vgl. Bilder 6.16 und 6.36). Bei der gewählten Bahntemperatur von  $\vartheta = 100\text{ °C}$  beträgt das Verhältnis der Geschwindigkeiten der Bahntemperaturzunahme  $(\Delta\vartheta/t)_{\text{NP}}/(\Delta\vartheta/t)_{\text{GP}} \approx 0,5$  (vgl. Bilder 6.15 und 6.35).

Wie Bild 6.37 zeigt, steigen die Bahntemperaturen nach  $t = 1\text{ s}$  im praxisrelevanten Bereich der Luftgeschwindigkeit von  $w_D = 30$  bis  $80\text{ m/s}$  annähernd linear an. Die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit um  $10\text{ m/s}$  führt beim Naturpapier zu Temperaturzunahmen von durchschnittlich  $8\text{ °C}$  und beim gestrichenen Papier von  $5\text{ °C}$ .



Bei geringen Luftgeschwindigkeiten von  $w_D = 20$  bis  $40$  m/s liegt die Endtemperatur des gestrichenen Papiers um  $30$  °C über der des Naturpapiers. Diese Differenz verringert sich mit zunehmender Luftgeschwindigkeit. Bei  $w_D = 100$  m/s weisen beide Bedruckstoffe die gleiche Temperatur auf.

Die Bahnendfeuchten (Bild 6.38) sinken mit zunehmender Luftgeschwindigkeit, wobei das Naturpapier nahezu über den gesamten betrachteten Bereich um  $20$  bis  $25$  % geringere Feuchtegehalte aufweist als das gestrichene.

## 6.2.6 Einfluß der Wasserdampfpartialdichte der Trocknungsluft

Wie die Sorptionsisothermen (vgl. Bild 4.2) zeigen, steigt der Feuchtegehalt von Papier mit wachsendem Wasserdampfpartialdruck der Umgebung. Im folgenden wird untersucht, ob sich der während der Rollenoffsetrocknung auftretende Papierfeuchteverlust durch eine zusätzliche Anreicherung des Trocknungsmediums mit Wasserdampf reduzieren läßt.

Für die Zustandsänderungen der Bedruckstoffe im Trockner werden Wasserdampfpartialdichten der Umgebung von  $\rho_{WD\infty} = 0, 0,1$  und  $0,42$  kg/m<sup>3</sup> gewählt, wobei der letztgenannte Wert einer reinen Wasserdampfatosphäre bei  $\vartheta_\infty = 240$  °C entspricht.

Beim Naturpapier läßt sich feststellen, daß eine zunehmende Wasserdampfpartialdichte  $\rho_{WD\infty}$  einen schnelleren Anstieg der Bahntemperaturen nach Trocknereintritt hervorruft (Bild 6.39). Diese Temperaturerhöhung ist auf die rasche Aufnahme von Wasser (Bild 6.40) und die dadurch freiwerdende Adsorptionswärme im Papier zurückzuführen. Bereits nach  $t \approx 0,08$  s beginnt die Desorption und die Temperatur nimmt langsamer zu.

Bei  $\rho_{WD\infty} = 0,42$  kg/m<sup>3</sup> ist die Temperatur des Naturpapiers nach  $t = 0,2$  s gegenüber der wasserdampffreien Trockneratmosphäre um  $40$  °C höher. Bis  $t = 0,8$  s läßt sich ein nahezu paralleler Verlauf der Temperaturen feststellen, da die Feuchteverluste im Bereich  $0,08 < t < 0,8$  s für die drei Wasserdampf-Umgebungspartialdichten annähernd gleich sind. Bei  $X/X_0 < 25$  % nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit ab, und die Bahntemperaturen steigen dadurch stärker an.



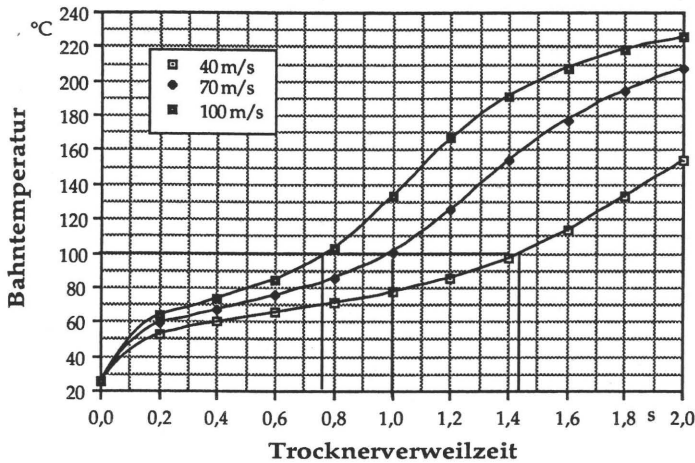


Bild 6.31: Naturpapier: Bahnentemperatur über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten an den Trocknerdüsen, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

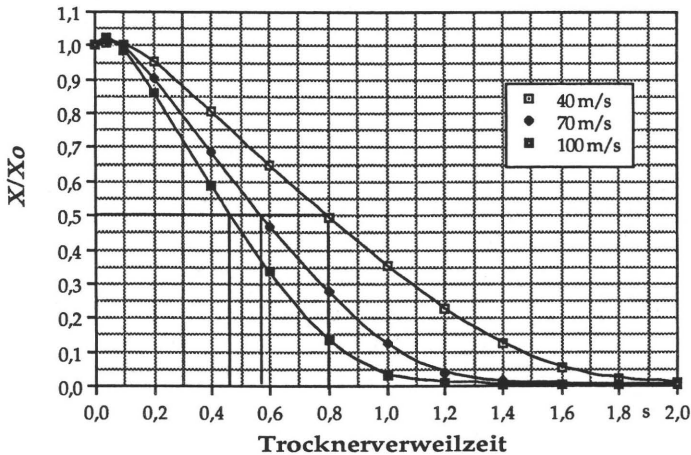


Bild 6.32: Naturpapier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten an den Trocknerdüsen, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

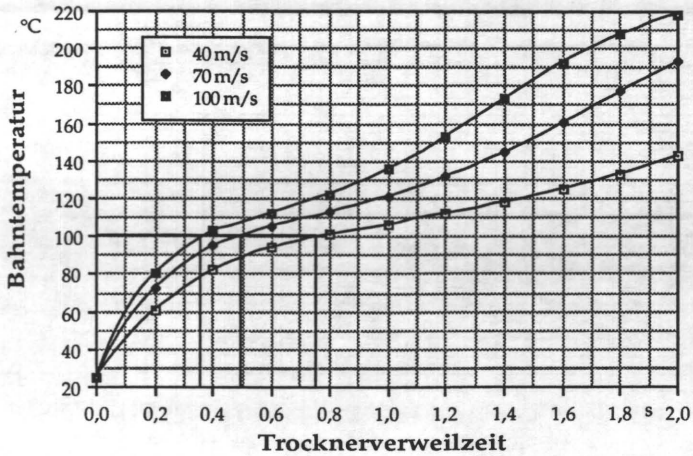


Bild 6.33: Gestrichenes Papier: Bahnentemperatur über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten an den Trocknerdüsen, ( $\vartheta_{\infty} = 240^{\circ}\text{C}$ )

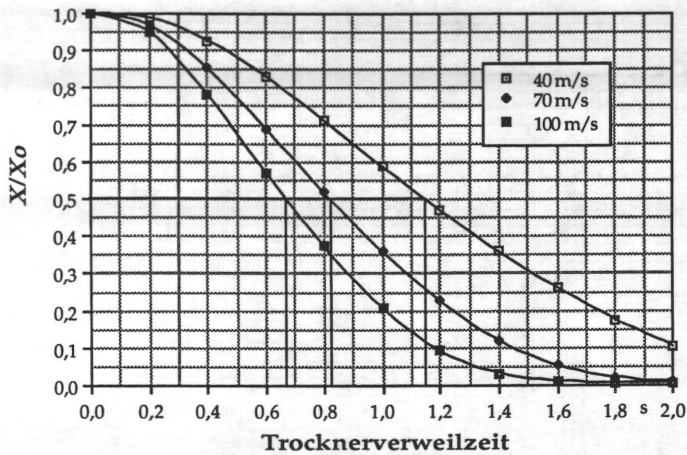


Bild 6.34: Gestrichenes Papier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten an den Trocknerdüsen

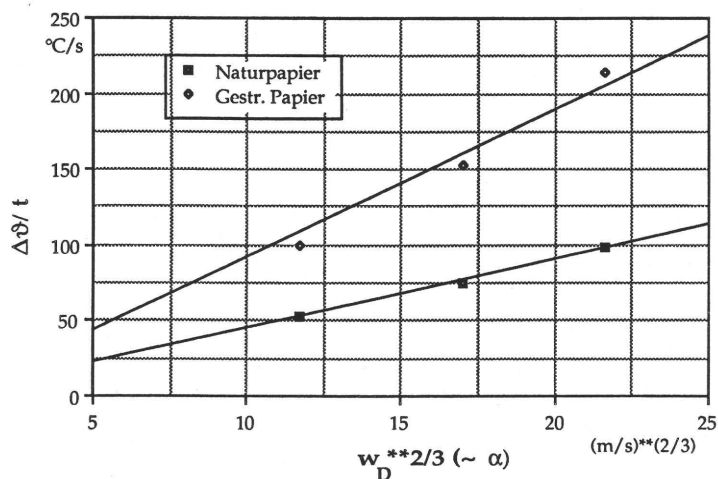


Bild 6.35: Mittlere Geschwindigkeit der Bahntemperaturzunahme in Abhängigkeit der zum Wärmeübergangskoeffizienten proportionalen Größe  $w_D^{2/3}$

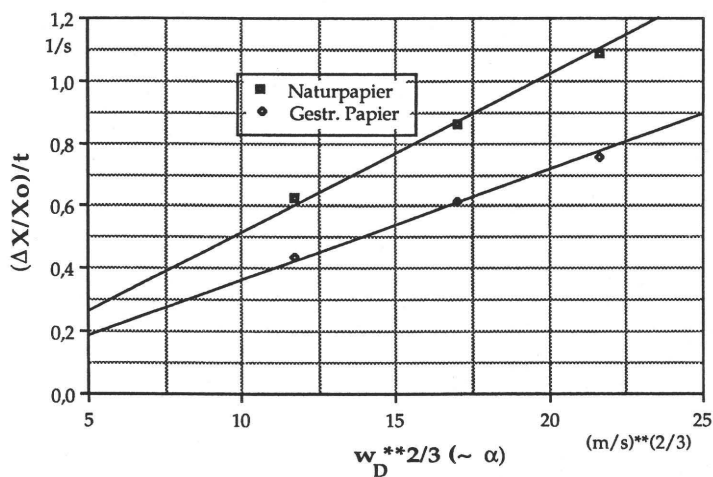


Bild 6.36: Mittlere Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der zum Wärmeübergangskoeffizienten proportionalen Größe  $w_D^{2/3}$

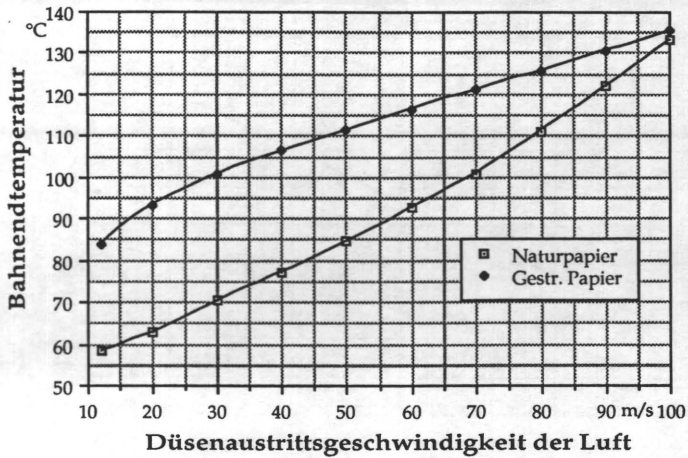


Bild 6.37: Bahntemperatur in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit an den Trocknerdüsen für Naturpapier und gestrichenes Papier nach  $t = 1$  s, ( $\vartheta_{\infty} = 240$  °C)

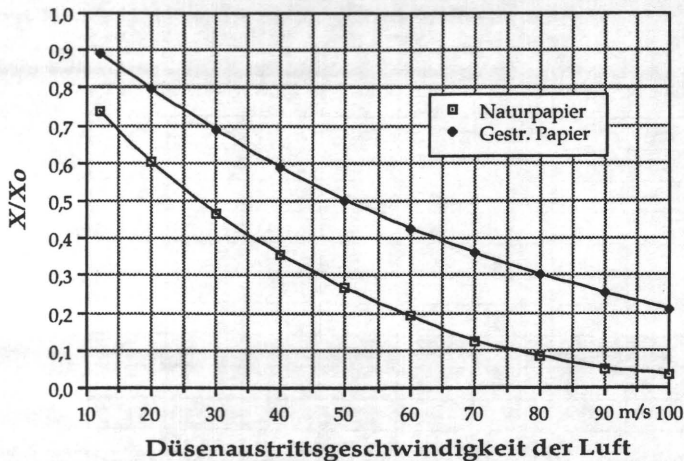


Bild 6.38: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladungen in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit an den Trocknerdüsen für Naturpapier und gestrichenes Papier nach  $t = 1$  s, ( $\vartheta_{\infty} = 240$  °C)

Wegen des höheren Diffusionswiderstands ist der Einfluß der Wasserdampfpartialdichte  $\rho_{WD\infty}$  auf die Temperaturen und Feuchtebeladungen des gestrichenen Papiers geringer als beim Naturpapier (Bilder 6.41 und 6.42). Bei  $\rho_{WD\infty} = 0,42 \text{ kg/m}^3$  wird bis  $t = 0,14 \text{ s}$  Wasser adsorbiert, wodurch die Anfangsbeladung um etwa 10 % zunimmt. Im Vergleich zum Trocknungsmedium ohne Wasserdampf beträgt die Temperaturdifferenz in diesem Zeitintervall maximal 25 °C. Nach  $t = 0,2 \text{ s}$  beginnt die Desorption und der steile Temperaturanstieg geht in einen flacheren über. Ab  $t > 0,6 \text{ s}$  liegen alle drei Temperaturkurven nahe beieinander und die geringfügig differierenden Feuchtebeladungen  $(\Delta(X/X_0)_{\max} \approx 8 \%)$  nehmen parallel zueinander ab.

Die Darstellung der Bahnendzustände (Bilder 6.43 und 6.44) verdeutlicht, daß sowohl die Temperaturen wie auch die Feuchtebeladungen mit wachsender Wasserdampfpartialdichte  $\rho_{WD\infty}$  steigen. Bei dem hier gezeigten Rechenbeispiel ist dieser Einfluß für das gestrichene Papier als gering einzustufen. Dagegen steigen im Naturpapier zwischen  $\rho_{WD\infty} = 0$  und  $0,42 \text{ kg/m}^3$  die Bahntemperatur um 27 °C und die Feuchtebeladung um 40 %.

Die vorangehenden Ausführungen zeigen, daß die Wasserdampfpartialdichte im Trocknungsmedium  $\rho_{WD\infty}$  die einzige Einflußgröße darstellt, mit der die Bahnendtemperaturen und die -feuchtebeladungen gemeinsam erhöht werden können. Wie noch gezeigt wird (siehe Kap. 6.3.2.3), nimmt auch die Geschwindigkeit der Druckfarbentrocknung zu, da zum einen die Bahn schneller erwärmt wird, und zum anderen der Stoffübergangskoeffizient  $\beta^*$  für den Mineralöldampf mit zunehmendem Wasserdampfgehalt des Trocknungsmediums steigt.

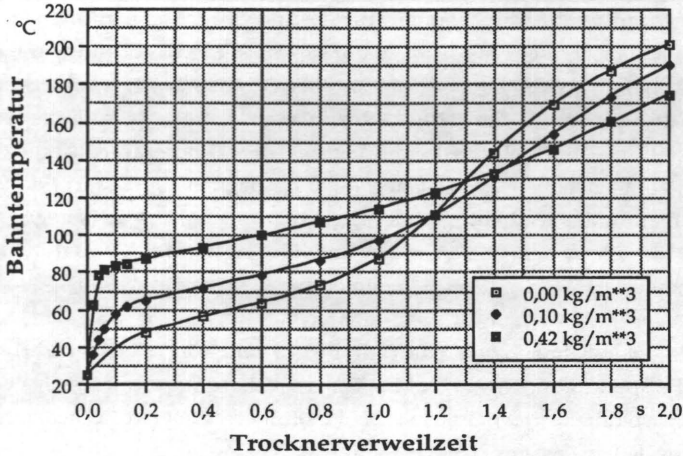


Bild 6.39: Naturpapier: Bahnentemperaturen über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Wasserdampfpartialdichten im Trockner, ( $\vartheta_{\infty} = 240\text{ °C}$ )

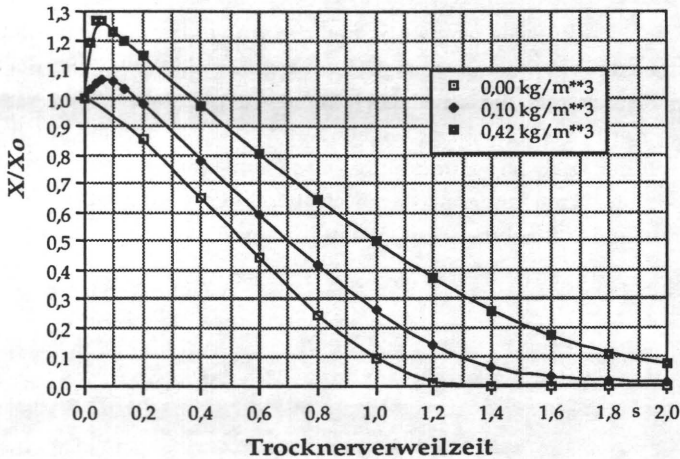


Bild 6.40: Naturpapier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladungen über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Wasserdampfpartialdichten im Trockner, ( $\vartheta_{\infty} = 240\text{ °C}$ )

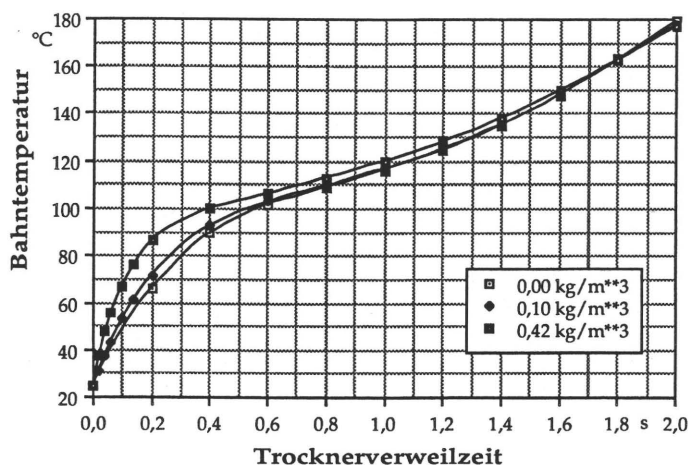


Bild 6.41: Gestrichenes Papier: Bahnentemperatur über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Wasserdampfpartialdichten im Trockner, ( $\vartheta_{\infty} = 240\text{ °C}$ )

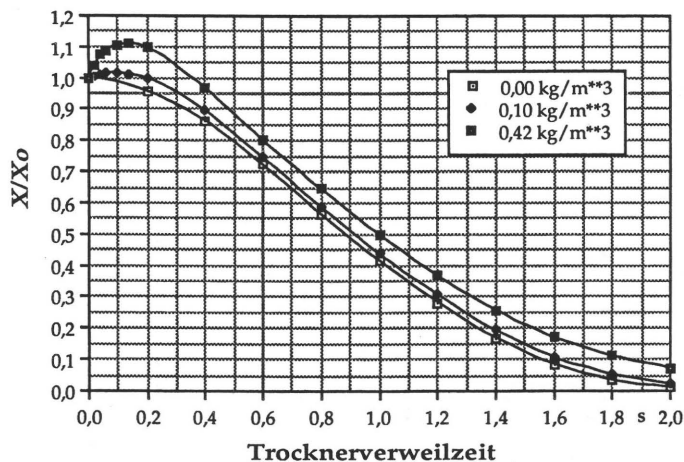


Bild 6.42: Gestrichenes Papier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Trocknerverweilzeit bei verschiedenen Wasserdampfpartialdichten im Trockner, ( $\vartheta_{\infty} = 240\text{ °C}$ )



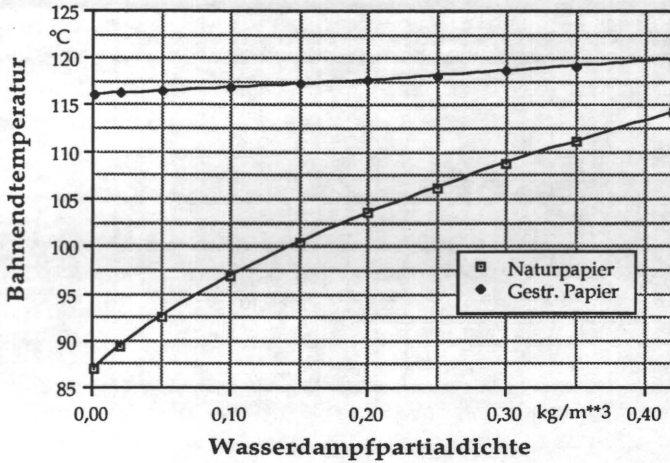


Bild 6.43: Bahnentemperatur über der Wasserdampfpartialdichte im Trockner für Naturpapier und gestrichenes Papier nach  $t = 1$  s, ( $\vartheta_{\infty} = 240$  °C)

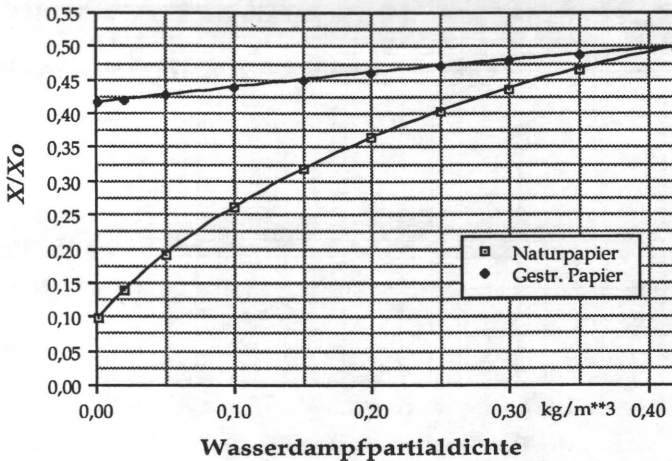


Bild 6.44: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Wasserdampfpartialdichte im Trockner für Naturpapier und gestrichenes Papier nach  $t = 1$  s, ( $\vartheta_{\infty} = 240$  °C)



## 6.3 Trockner mit mehreren Zonen

In den letzten Jahren werden Trockner für Rollenoffsetmaschinen überwiegend mit mehreren Zonen, die unterschiedliche Trocknungsbedingungen erlauben, ausgeführt. Dabei werden die Lufttemperaturen von Zone zu Zone verringert, wodurch sich nach einer schnellen Bahnaufheizung im vorderen Trocknerabschnitt nahezu konstante Bahntemperaturen im weiteren Verlauf der Trocknung einstellen sollen. Die beschleunigte Erwärmung der Bahn ermöglicht gleiche Lösemittelverdunstungsraten bei geringeren maximalen Bahntemperaturen, wodurch Beschädigungen des Papiers reduziert werden.

Im folgenden soll untersucht werden, wie sich die Bahntemperaturen und -feuchtebeladungen im Trockner mit drei Zonen unter verschiedenen Trocknungsbedingungen verhalten.

Für die Ausführungen in diesem Kapitel werden folgende Eingangsgrößen vorausgesetzt:

- Trocknerverweilzeit:  $t = 1 \text{ s}$
- Trocknerlänge:  $l_T = 10 \text{ m}$
- Bahngeschwindigkeit:  $v_B = 10 \text{ m/s}$
- Flächenmasse Naturpapier:  $m_B = 60 \text{ g/m}^2$
- Flächenmasse gestr. Papier:  $m_B = 80 \text{ g/m}^2$

Die hier nicht gesondert aufgeführten Daten sind der Auflistung am Beginn des Kap. 6 zu entnehmen.

### 6.3.1 Heißluft-Mehrzonentrockner

#### 6.3.1.1 Naturpapier

Die Größen für die einzelnen Trocknerzonen sind in Tabelle 6.4 dargestellt.

Um eine beidseitig einschichtig aufgetragene Farbschicht auf dem hier verwendeten Papier in einer Trocknerzone während  $t = 1 \text{ s}$  ausreichend zu

Trocknerzone		I	II	III
Zonenlänge [m]		4	3	3
Temperaturen	a	250	250	250
$\vartheta_{\infty}$ der	b	280	250	205
Rechenbeispiele	c	300	240	185
[°C]	d	300	270	150

Tabelle 6.4: Trocknerabmessungen und Trocknungslufttemperaturen

verfestigen, ist eine Trocknungslufttemperatur von  $\vartheta_{\infty} = 250$  °C (Rechnung a) erforderlich. Bei den Rechenbeispielen b bis d wurden die Temperaturen  $\vartheta_{\infty}$  so gewählt, daß jeweils die gleiche Menge Mineralöl verdunstet. Bei der konstanten Trocknungslufttemperatur (a) ergibt sich erwartungsgemäß die höchste Bahnendtemperatur mit  $\vartheta_{B1} = 127,5$  °C (Bild 6.45). Die niedrigste Bahnendtemperatur mit  $\vartheta_{B1} = 111,5$  °C stellt sich im Fall d ein. Die vorderen Zonen werden mit hohen Lufttemperaturen von  $\vartheta_{\infty I} = 300$  °C und  $\vartheta_{\infty II} = 270$  °C betrieben, wodurch in der letzten Zone  $\vartheta_{\infty III} = 150$  °C ausreichen. Die Endfeuchtebeladungen (Bild 6.46) sind in allen vier Beispielen nahezu gleich.

### 6.3.1.2 Gestrichenes Papier

Wie zuvor, werden vier unterschiedliche Trocknereinstellungen, die der Tabelle 6.5 zu entnehmen sind, verglichen.

Trocknerzone		I	II	III
Zonenlänge [m]		4	3	3
Temperaturen	a	240	240	240
$\vartheta_{\infty}$ der	b	260	240	190
Rechenbeispiele	c	280	230	170
[°C]	d	280	250	150

Tabelle 6.5: Trocknerabmessungen und Trocknungslufttemperaturen

Auch beim gestrichenen Papier zeigt sich, daß die niedrigsten Bahnendtemperaturen erreicht werden, wenn die vorderen Trocknerzonen mit hohen Lufttemperaturen betrieben werden (Bild 6.47, Verlauf d). Dabei läßt sich

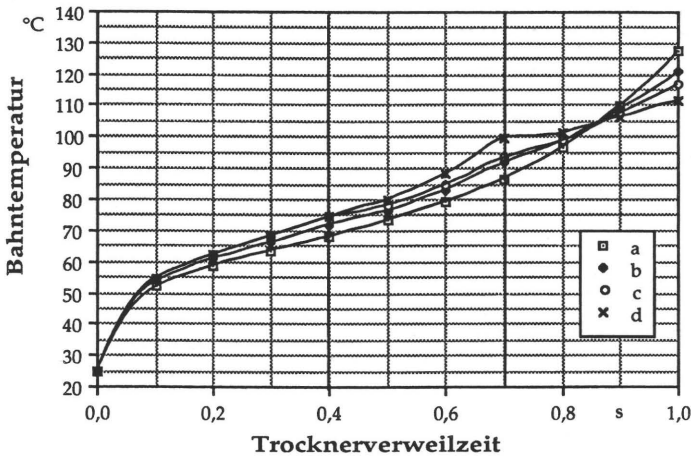


Bild 6.45: Naturpapier: Bahntemperatur über der Verweilzeit in einem Dreizonentrockner unter verschiedenen Trocknungsbedingungen

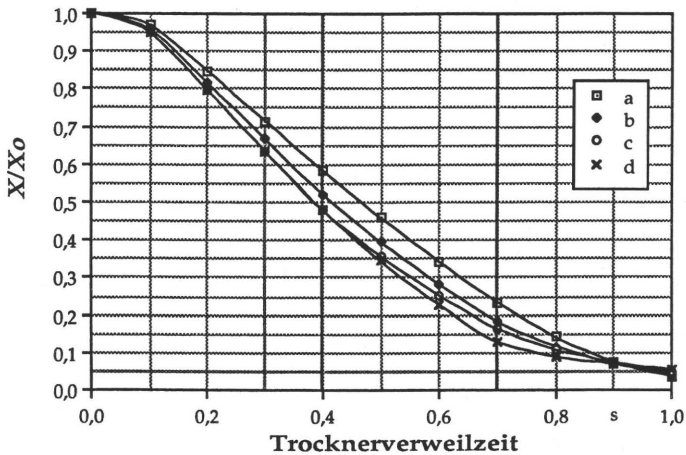


Bild 6.46: Naturpapier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Verweilzeit in einem Dreizonentrockner unter verschiedenen Trocknungsbedingungen

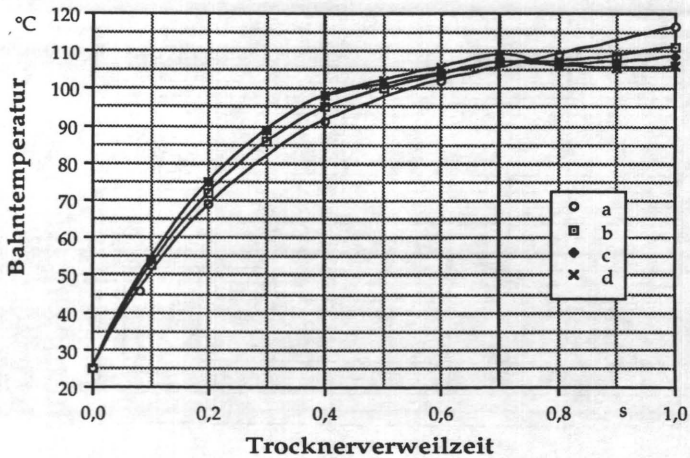


Bild 6.47: Gestrichenes Papier: Bahnentemperatur über der Verweilzeit in einem Dreizonentrockner unter verschiedenen Trocknungsbedingungen

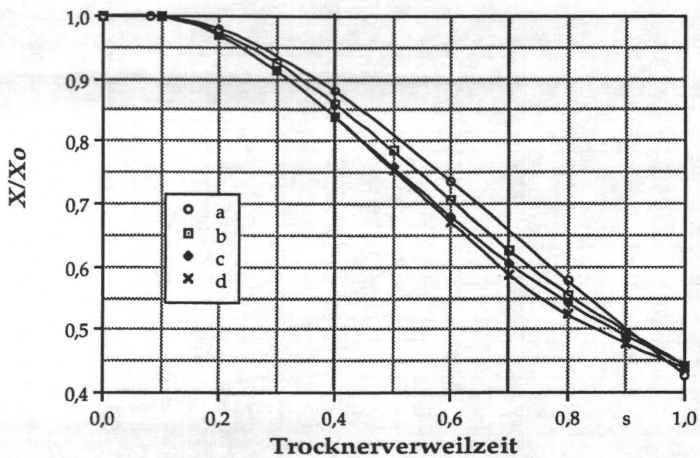


Bild 6.48: Gestrichenes Papier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Verweilzeit in einem Dreizonentrockner unter verschiedenen Trocknungsbedingungen

feststellen, daß durch die niedrige Temperatur in der 3. Zone von  $\vartheta_{\infty III} = 150\text{ °C}$  die Bahntemperatur bereits im Trockner leicht abnimmt. Gegenüber dem Betrieb mit konstanter Lufttemperatur (Verlauf a) wird die Bahnendtemperatur im Fall d um  $10,5\text{ °C}$  gesenkt.

Die Bahnendfeuchtebelastungen sind für alle Rechenbeispiele praktisch gleich (Bild 6.48).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß durch eine optimierte Einstellung des Mehrzonentrockners die Bahnendtemperatur gesenkt werden kann. Auf diese Weise lassen sich Schäden am Papier vermeiden, und es werden Energieeinsparungen im Trockner und an den Kühlwalzen erzielt. Die Endfeuchtebelastung des Papiers bleibt gegenüber der Einzonentrocknung praktisch gleich.

### 6.3.2 Mehrzonentrockner mit Wasserdampf

Um die Druckfarbe während der angestrebten kurzen Trocknerverweilzeit von  $t = 1\text{ s}$  ausreichend zu trocknen, sind die beteiligten Größen in der Gl. (5.15) - zu nennen sind hier insbesondere der Stoffübergangskoeffizient  $\beta^*$  und das treibende Potential  $B = (p_{MD}''(T_1) - p_{MD\infty})/(p - p_{MD}''(T_1))$  und damit der Mineralöldampfdruck in der Farbschicht  $p_{MD}''(T_1)$  - möglichst groß einzustellen. Hohe Partialdampfdrücke  $p_{MD}''(T_1)$  werden durch hohe Bahntemperaturen realisiert (vgl. Bilder 5.8 und 5.9), wofür der Bahn vom Trocknungsmedium ein großer Wärmestrom  $\dot{q}$  mit hohen Temperaturen  $\vartheta_{\infty}$  und Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha^*$  zugeführt wird (vgl. Gl. (4.107)). Sind das Trocknungsmedium und die Trocknergeometrie vorgegeben, läßt sich der Wärmeübergangskoeffizient primär über die Düsenaustrittsgeschwindigkeit des Trocknungsmediums ( $\alpha \sim w_D^{2/3}$ , vgl. Gl. (4.124)) erhöhen.

Die oben genannte Forderung nach einem großen Stoffübergangskoeffizienten  $\beta^*$  wird wegen der Analogie von Wärme- und Stoffübergang (vgl. Gl. (4.115 a und b)) durch das Einstellen eines hohen Wärmeübergangskoeffizienten erfüllt.

Wie die in den Kap. 6.1 bis 6.2.5 und 6.3.1 dargestellten Berechnungsbeispiele zeigen, stellt sich bei der Heißlufttrocknung unter den genannten Bedingungen für eine ausreichende Mineralölverdunstung gleichzeitig eine erhebliche Reduzierung der gebundenen Papierfeuchte ein. Die oben aufgestellten

Forderungen bezüglich der Farbverfestigung lassen sich jedoch ebenso mit Wasserdampf als Trocknungsmedium erfüllen. Wie in Kap. 6.2.6 gezeigt, wächst die Restfeuchte des Papiers mit zunehmender Wasserdampfpartialdichte  $\rho_{WD\infty}$  im Trockner. Zusätzlich ist die Verdunstungsgeschwindigkeit der Farbverdünnungsmittel in Wasserdampf größer als in Luft, wie noch gezeigt wird (siehe Kap. 6.3.2.3).

Im folgenden wird untersucht, wie sich eine Konvektionstrocknung mit Wasserdampf realisieren läßt, und welche Auswirkungen dies auf Bahntemperaturen und -feuchtegehalte hat.

Bei der Rollenoffsettrocknung darf wegen der Gefahr von Papierabrissen und um Glanzverlust am Druckprodukt zu vermeiden, keine Kondensation an der Bahn auftreten. Wird der Bedruckstoff vor Eintritt in die Wasserdampfatmosfera ausreichend vorgewärmt, treten diese Probleme nicht auf. Nach dem Austritt aus der Wasserdampf-Trocknerzone ist die Grenzschicht um die Bahn mit Wasserdampf beladen, was wiederum zu Kondensation mit den damit verbundenen unerwünschten Begleiterscheinungen führen kann. Daher ist eine dritte Trocknerzone erforderlich, in der diese Grenzschicht durch Prallstrahldüsen abgerakelt wird.

Ein derartiger Trockner besteht folglich aus mindestens drei getrennten Sektionen:

1. Zone I zum Vorwärmen der Bahn.
2. Zone II mit hoher Wasserdampfpartialdichte.
3. Zone III, in der mit Warmluft versorgte Prallstrahldüsen zur Entfernung der wasserdampfbeladenen Grenzschicht angebracht sind.

Dabei werden Düsengeometrie und -anordnung des herkömmlichen Heißluft-trockners beibehalten. Zone I kann alternativ auch mit Infrarotstrahlern betrieben werden.

Wie im vorherigen Kap. 6.3.1 wird eine Bahngeschwindigkeit von  $v_B = 10 \text{ m/s}$  und eine Gesamttrocknerlänge von  $l_T = 10 \text{ m}$  vorausgesetzt. Ebenso werden die Flächenmassen der Bedruckstoffe beibehalten (Naturpapier:  $m_B = 60 \text{ g/m}^2$ , gestrichenes Papier:  $m_B = 80 \text{ g/m}^2$ ). Die Eingangsgrößen bezüglich Trocknerabmessungen und -temperaturen sind Tabelle 6.6 zu entnehmen.

Trocknerzone	I	II	III
Zonenlänge [m]	4	5	1
Temperaturen $\vartheta_{\infty}$ [°C]			
Naturpapier	300	120	50
Gestr. Papier	280	130	50

Tabelle 6.6: Trocknerabmessungen und Temperaturen des Trocknungsmediums

Um den Einfluß des Wasserdampfs auf die Zielgrößen aufzuzeigen, werden die Partialdichten in Zone II zwischen  $\rho_{WD\infty} = 0,05$  und  $0,5 \text{ kg/m}^3$  variiert.

Auf die Darstellung der Zustandsänderungen der Bedruckstoffe in Zone I ( $0 < t < 0,4 \text{ s}$ ) wird verzichtet, da diese identisch sind mit den in den Bildern 6.45 bis 6.48 gezeigten Verläufen c und d.

### 6.3.2.1 Naturpapier

Wie Bild 6.49 zeigt, steigt die Temperatur des Naturpapiers am Eintritt der Zone II bei  $\rho_{WD\infty II} = 0,5 \text{ kg/m}^3$  innerhalb von  $0,04 \text{ s}$  um nahezu  $35 \text{ °C}$  an, während  $X/X_0$  gleichzeitig um  $18 \text{ %}$  zunimmt (Bild 6.50). In der mit Heißluft betriebenen Vorheizzone erwärmt sich der Bedruckstoff und verliert dabei Feuchte. Bei Eintritt in die Wasserdampftrocknerzone diffundieren große Mengen von Wasserdampf ins Papier und werden dort adsorbiert. Die freiwerdende Adsorptionswärme erhöht die Bahntemperatur.

Im weiteren Verlauf der Trocknung bleibt die Temperatur nahezu gleich und die Feuchtebeladung nimmt geringfügig ab.

In Zone III reduziert sich  $X/X_0$  innerhalb von  $0,1 \text{ s}$  um  $21 \text{ %}$ . Durch diesen Desorptionsvorgang wird die Papiertemperatur um  $45 \text{ °C}$  gesenkt und die Bahn verläßt den Trockner mit lediglich  $\vartheta_{B1} = 66 \text{ °C}$ .

Mit abnehmender Wasserdampfpartialdichte  $\rho_{WD\infty}$  sinken die Bahntemperaturen und die Feuchtebeladungen in Zone II wie auch die Endfeuchtebeladung. Dagegen steigt die Bahnendtemperatur bei den hier gewählten Eingangsgrößen.



### 6.3.2.2 Gestrichenes Papier

Wegen der geringen Feuchtereduzierung und der höheren Bahntemperatur in Zone I ist das zuvor beschriebene Verhalten beim gestrichenen Papier weniger ausgeprägt als beim Naturpapier (Bilder 6.51 und 6.52). So ist erst ab  $\rho_{WD\infty II} \geq 0,3 \text{ kg/m}^3$  eine Erhöhung der Bahntemperatur am Beginn der Zone II festzustellen. Die Temperaturänderungen in Zone II sind kleiner, die Feuchteabnahme dagegen größer als im Naturpapier. Die Temperatur- und Feuchtereduzierung in Zone III ist gegenüber dem Naturpapier verringert.

Um hinsichtlich der Druckfarbentrocknung die gleichen Resultate wie in Kap. 6.3.1 zu erzielen, sind beim Naturpapier  $\rho_{WD\infty II} = 0,35 \text{ kg/m}^3$  und beim gestrichenen Papier  $\rho_{WD\infty II} = 0,5 \text{ kg/m}^3$  erforderlich.

### 6.3.2.3 Vergleich der Trocknungsmedien Heißluft und Wasserdampf

Die in Kap. 6.3.2 gezeigte Trocknungsvariante ermöglicht im Vergleich zur Heißluft-Mehrzonentrocknung wesentlich größere Bahnrestfeuchten bei gleichzeitig niedrigeren Endtemperaturen.

Daneben weist die Wasserdampftrocknung weitere Vorteile auf.

Das im Trockner befindliche Gemisch aus Wasser- und Mineralöldampf kann kondensiert und durch Abscheiden voneinander getrennt werden, wodurch die Thermische Nachverbrennung für diesen Trocknerabschnitt entfällt (siehe hierzu /6.1/).

Wie folgende Abschätzung zeigt, ist darüber hinaus die Trocknungsgeschwindigkeit des Mineralöls im Trocknungsmedium Wasserdampf höher als in einer Heißluftatmosphäre. Für die Trocknungsgeschwindigkeit des Mineralöls gilt (vgl. Gleichungen (5.15) und (5.16)):

$$\dot{m}_{MD} = \beta^* \frac{p}{R T_G} \frac{M_{MD}}{p - p_{MD}''(T_1)} \frac{p_{MD}''(T_1) - p_{MD\infty}}{p - p_{MD}''(T_1)} \quad (6.1)$$



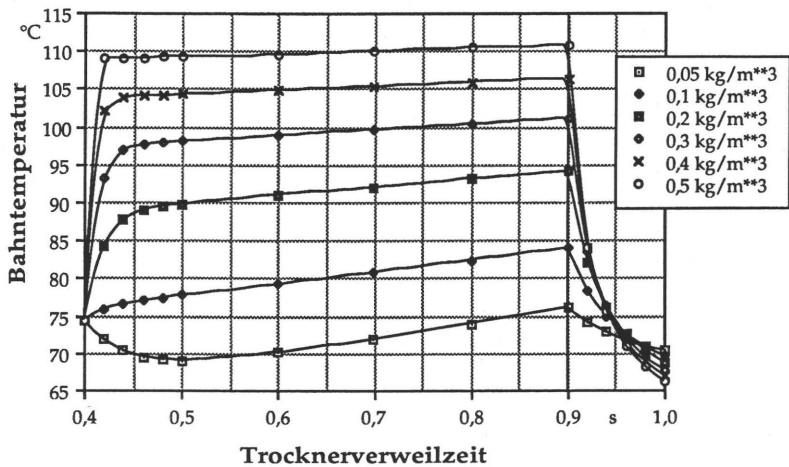


Bild 6.49: Naturpapier: Bahn­temperatur über der Verweilzeit in einem Wasserdampftrockner bei verschiedenen Wasserdampfpartialdichten

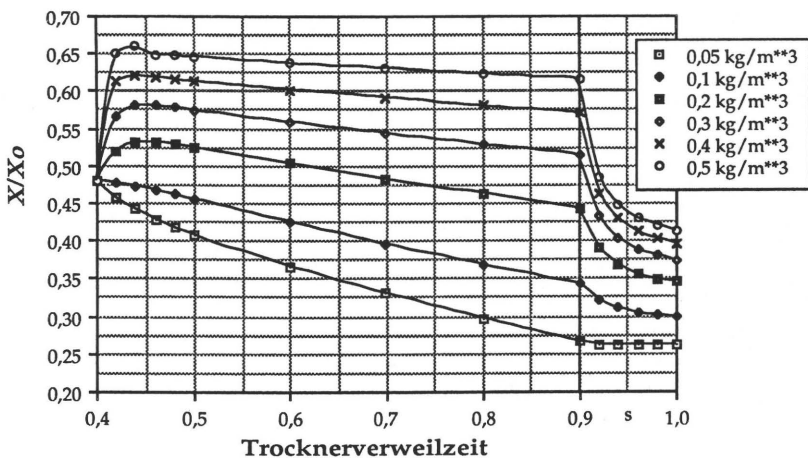


Bild 6.50: Naturpapier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasser­beladung über der Verweilzeit in einem Wasserdampftrockner bei verschiedenen Wasserdampfpartialdichten

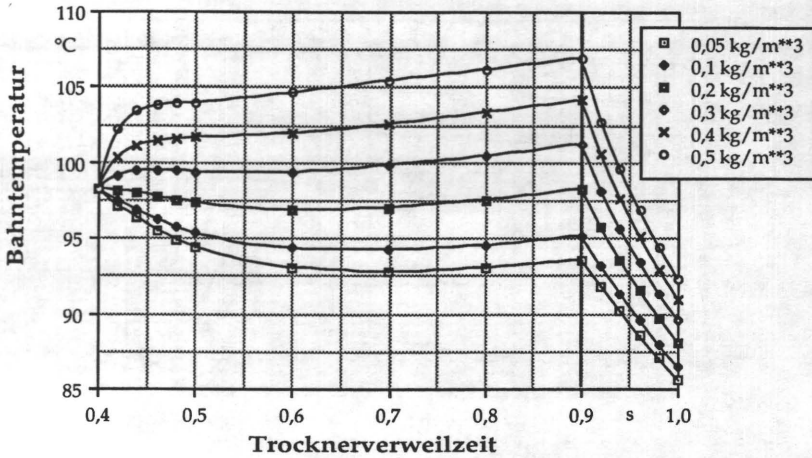


Bild 6.51: Gestrichenes Papier: Bahnentemperatur über der Verweilzeit in einem Wasserdampftrockner bei verschiedenen Wasserdampfpartialdichten

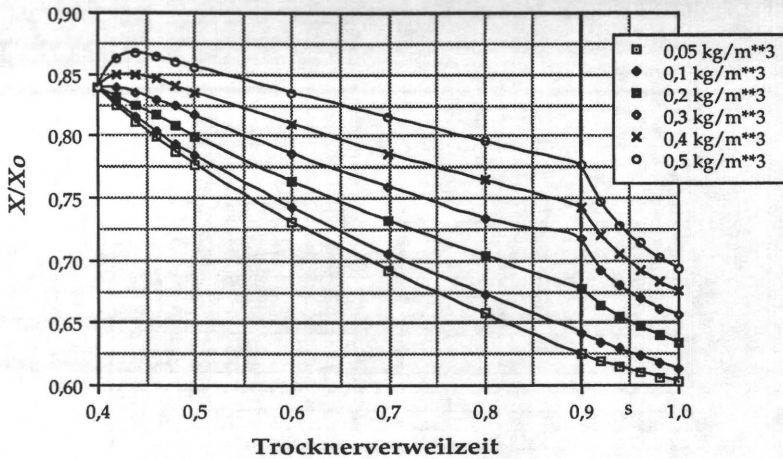


Bild 6.52: Gestrichenes Papier: Auf die Anfangsfeuchtebeladung bezogene Wasserbeladung über der Verweilzeit in einem Wasserdampftrockner bei verschiedenen Wasserdampfpartialdichten

Für einen quantitativen Vergleich wird das Verhältnis aus den Trocknungsgeschwindigkeiten des Mineralöls in Wasserdampf und in Luft gebildet. Dabei wird vorausgesetzt, daß mit Ausnahme der Stoffübergangskoeffizienten  $\beta^*$  und der Temperaturen  $T_G$  die beteiligten Einflußgrößen in der Gl. (6.1) für beide Trocknungsmedien gleich sind. Wie bereits in Kap. 5.5 dargestellt, soll sich an der Bedruckstoffoberfläche der temperaturabhängige Sättigungsdampfdruck des Mineralöls  $p_{MD}''(T_1)$  einstellen. Da  $p_{MD}''(T_1)$  für beide Trocknungsmedien gleich sein soll, müssen folglich auch die Bahntemperaturen gleich sein.

Für das Verhältnis aus den Trocknungsgeschwindigkeiten ergibt sich daraufhin:

$$\frac{\dot{m}_{MD,WD}}{\dot{m}_{MD,L}} = \frac{\beta_{WD}^*}{\beta_L^*} \frac{T_{G,L}}{T_{G,WD}} \quad (6.2)$$

Für  $\beta^*$  werden die Gleichungen (4.97) und (4.125) eingesetzt. Die Düsengeometrie und die Düsenaustrittsgeschwindigkeit seien für beide Trocknungsmedien gleich. Daraus folgt für das Verhältnis der Trocknungsgeschwindigkeiten:

$$\frac{\dot{m}_{MD,WD}}{\dot{m}_{MD,L}} = \left( \frac{D_{MD,WD}'}{D_{MD,L}'} \right)^{0,58} \left( \frac{v_L}{v_{WD}} \right)^{0,25} \frac{T_{G,L}}{T_{G,WD}} \quad (6.3)$$

Die Berechnung der Diffusionskoeffizienten für Gasdiffusion erfolgt nach Gl. (4.84). Die dafür erforderlichen Stoffwerte zeigt Tabelle 6.7. Als Modells substanz für das Mineralöl wird wie zuvor n-Tetradekan ( $C_{14}H_{30}$ ) verwendet.

	Molare Masse M [kg/kmol]	Diffusionsvolumen $v_D$
Luft	29	20,1
Wasser	18	12,7
$C_{14}H_{30}$	198	290,4

Tabelle 6.7: Stoffwerte für die Berechnung der Diffusionskoeffizienten

Mit Ausnahme der Temperatur sind die stoffunabhängigen Größen aus Gl. (4.84) für beide Diffusionskoeffizienten gleich und werden in der Konstanten  $K$  zusammengefaßt.

Diffusionskoeffizient Mineralöldampf - Luft:

$$D_{MD,L}' = \frac{\left(\frac{29 + 198}{29 \cdot 198}\right)^{1/2}}{(20,11^{1/3} + 290,41^{1/3})^2} K T_G^{1,75} = 2,2787 \cdot 10^{-3} K T_G^{1,75} \quad (6.4)$$

Diffusionskoeffizient Mineralöldampf - Wasserdampf:

$$D_{MD,WD}' = \frac{\left(\frac{18 + 198}{18 \cdot 198}\right)^{1/2}}{(12,71^{1/3} + 290,41^{1/3})^2} K T_G^{1,75} = 3,0697 \cdot 10^{-3} K T_G^{1,75} \quad (6.5)$$

Die oben genannte Forderung nach gleichen Bahntemperaturen läßt sich nicht exakt erfüllen, da die Temperaturverläufe des Papiers  $\vartheta = f(t)$  für die beiden Trocknungsmedien bei gleichen Anfangsbedingungen unterschiedlich sind (vgl. Bilder 6.45, 6.47, 6.49 und 6.51). Eine für die hier gezeigte Abschätzung ausreichende Übereinstimmung der über die Trocknerverweilzeit gemittelten Bahntemperaturen ist in den Berechnungsbeispielen für das gestrichene Papier gegeben (Heißlufttrocknung: Bild 6.47, Kurve d, Wasserdampftrocknung: Bild 6.51, obere Kurve). Die Vorerwärmung der Bahn in der Trocknerzone I ist für die beiden Trocknungsvarianten identisch und wird hier nicht berücksichtigt. Für die Heißlufttrocknung werden die Trocknerzonen II und III zusammen und für die Wasserdampftrocknung nur die Wasserdampfzone II betrachtet. In beiden Fällen liegen die über der Trocknerverweilzeit gemittelten Bahntemperaturen im Bereich von  $\vartheta \approx 105^\circ\text{C}$ . Dabei beträgt die mittlere Heißlufttemperatur  $\vartheta_{\infty,L} = 200^\circ\text{C}$  und die Wasserdampftemperatur  $\vartheta_{\infty,WD} = 130^\circ\text{C}$ , woraufhin sich mittlere Grenzschichttemperaturen von  $\vartheta_{G,L} \approx 152,5^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_{G,WD} \approx 117,5^\circ\text{C}$  ergeben. Die zugehörigen dynamischen Viskositäten liegen bei  $\nu_L(152,5^\circ\text{C}) = 29 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  und  $\nu_{WD}(117,5^\circ\text{C}) = 24,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Einsetzen dieser Werte in Gl. (6.3) liefert für das Verhältnis der Trocknungsgeschwindigkeiten:

$$\frac{\dot{m}_{MD,WD}}{\dot{m}_{MD,L}} = \left( \frac{3,0697}{2,2787} \left( \frac{390,5}{425,5} \right)^{1,75} \right)^{0,58} \left( \frac{29}{24,5} \right)^{0,25} \frac{425,5}{390,5} = 1,238 \quad (6.6)$$

Wie im folgenden dargestellt, kann damit die Trocknerlänge bei Wasserdampftrocknung gegenüber der Heißlufttrocknung reduziert werden.

Wie in Gl. (5.20) bereits gezeigt, ergibt sich die im Trockner verdunstete Mineralölmasse  $m_{MD}$  durch Integration der Trocknungsgeschwindigkeit über der Verweilzeit. Da im hier behandelten Beispiel mit mittleren Trocknungsgeschwindigkeiten gerechnet wird, kann  $m_{MD}$  wie folgt bestimmt werden

$$m_{MD} = \dot{m}_{MD} t_T = \dot{m}_{MD} \frac{l_T}{v_B} \quad (6.7)$$

Ausgehend von gleichen auszutreibenden Mineralölmassen und gleichen Bahngeschwindigkeiten  $v_B$  ergibt sich im vorliegenden Beispiel folgendes Verhältnis für die erforderlichen Trocknerlängen  $l_T$  (bezieht sich, wie oben vorausgesetzt, auf die Trocknersegmente nach der Vorheizzone I).

$$l_{T,WD} = \frac{\dot{m}_{MD,L}}{\dot{m}_{MD,WD}} l_{T,L} = 0,81 l_{T,L} \quad (6.8)$$

Den erwähnten Vorteilen bei der Verwendung von Wasserdampf stehen Nachteile wie erhöhte Korrosionsgefahr und Dichtungsprobleme am Trockner gegenüber.

## 6.4 Vergleich von Rechnung und Messung

### 6.4.1 Messungen an Produktionsmaschinen

Zur Verifizierung des vorgestellten Simulationsmodells wurden umfangreiche Messungen an Trocknern von Rollenoffset-Produktionsmaschinen durchgeführt. Die Versuche gliederten sich in folgende Schritte:

1. Gravimetrische Bestimmung der Flächenmasse des Papiers vor dem Bedrucken und nach der Trocknung. Dazu wurden mit dem in Kap. 5.1 beschriebenen Rundprobenschneider 100 cm<sup>2</sup> große Proben ausgeschnitten und mit einer Analysenwaage (Auflösung: 10<sup>-4</sup> g) gewogen. Zur Ermittlung der Masse des trockenen Bedruckstoffs und der Wasserbeladung wurden diese Proben mit der bereits erwähnten Dörr-Wägemethode in einem

Trockenschrank bei  $\vartheta = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$  je 2 h bis zur Massekonstanz getrocknet (vgl. Kap. 5.1.1.1).

2. Messung der Bahntemperaturen direkt vor und nach dem Trockner mit einem Hand-Infrarotthermometer (Genauigkeit:  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
3. Ermittlung der Trocknungslufttemperaturen über die Anzeige am Steuerpult der Maschine.
4. Messung der Bahngeschwindigkeit mit einem mechanischen Präzisions-Handtachometer.

Die hier beschriebenen Untersuchungen beschränken sich auf die unbedruckten Flächen der Bedruckstoffbahn. Zur Überprüfung der Modellannahmen wurden aus insgesamt 35 vorliegenden Meßreihen die Versuche mit geringer Farbflächendeckung ( $< 10\%$ ) des Papiers ausgewählt.

Da die laufende Produktion durch Messungen in der Regel nicht beeinträchtigt werden darf, gestaltet sich die systematische Untersuchung einzelner Einflußparameter sehr schwierig. Die relevanten Größen lassen sich meist nur für einen einzelnen Betriebszustand der Maschine, der während des gesamten Druckauftrags beibehalten wird, aufnehmen.

Lediglich in einem Fall war es möglich, bei drei verschiedenen Trocknungslufttemperaturen und sonst gleichbleibenden Bedingungen zu messen. Diesen Versuchen lagen folgende Eingangsdaten zu Grunde:

• Bahngeschwindigkeit	$v_B = 4,2\text{ m/s}$
• Trocknerlänge	$l_T = 7\text{ m}$
• Trocknerverweilzeit	$t_T = 1,66\text{ s}$
• Flächenmasse des (mattgestrichenen) Papiers:	$m_B = 100\text{ g/m}^2$
• Papierdichte	$\rho_B = 750\text{ kg/m}^3$
• Papierdicke	$s_B = 125\text{ }\mu\text{m}$
• Wasserbeladung vor dem Bedrucken	$X_v = 0,06$

In den Bildern 6.53 und 6.54 sind Resultate von Versuch und Berechnung nach der Trocknung dargestellt.

Bei  $\vartheta_{\infty 1} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $\vartheta_{\infty 2} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  stimmen die berechneten und die gemessenen Werte recht gut überein, während bei  $\vartheta_{\infty 3} = 240\text{ }^{\circ}\text{C}$  Abweichungen festzustellen

sind. Sowohl die Feuchtebeladung wie auch die Temperatur des Versuchs sind höher als die der Rechnung.

Diese Beobachtung läßt vermuten, daß der Diffusionswiderstand bei geringen Feuchtebeladungen (je nach Papiersorte  $X < 0,5$  bis 2 %) zunimmt, da nur noch die kleinen Papierporen Wasser enthalten. Dadurch sinkt der zum Porendurchmesser proportionale Diffusionskoeffizient für KNUDSENSche Molekularbewegung. Insbesondere bei satinierten und gestrichenen Papieren mit kleinen durchschnittlichen Porendurchmessern ( $d < 10^{-6}$  m) kann dies (bei geringen Restfeuchten) zu einer erheblichen Reduzierung des äquivalenten Diffusionskoeffizienten für die Überlagerung der Transportmechanismen nach Gl. (4.81) führen. Die Trocknungsgeschwindigkeit des Wasserdampfs sinkt gegenüber den Modellrechnungen, wodurch weniger Desorptionsenergie beansprucht wird, und die Bahntemperatur schneller zunimmt. Um das Modell genauer anzupassen, ist ein von der Wasserbeladung des Papiers abhängiger Diffusionskoeffizient zu ermitteln, wofür jedoch weitere Forschungsarbeit erforderlich ist. Hierzu bleibt anzumerken, daß Feuchtebeladungen von  $X < 2$  % bei satinierten und gestrichenen Papieren durch optimale Einstellung der an der Trocknung beteiligten Größen nicht auftreten.

In Naturpapieren mit  $d = 2 \cdot 10^{-6}$  bis  $5 \cdot 10^{-6}$  m und einem geringen Anteil von Poren mit  $d < 10^{-6}$  m wird der Transport des Wasserdampfs durch die Gasdiffusion bestimmt, so daß der äquivalente Diffusionskoeffizient auch bei kleinen Wasserbeladungen annähernd konstant bleibt.

Tabelle 6.8 zeigt die Resultate von Messungen an einem Naturpapier und zugehöriger Rechnung. Dabei waren lediglich zwei von vier Druckeinheiten in Betrieb, so daß hier von einer Feuchteaufnahme des Papiers während der Druckvorgänge von  $\Delta m_W = 1,1$  g/m<sup>2</sup> ausgegangen wird. Der Trockner bestand aus drei Temperaturzonen von je 3 m Länge.

Es zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung.



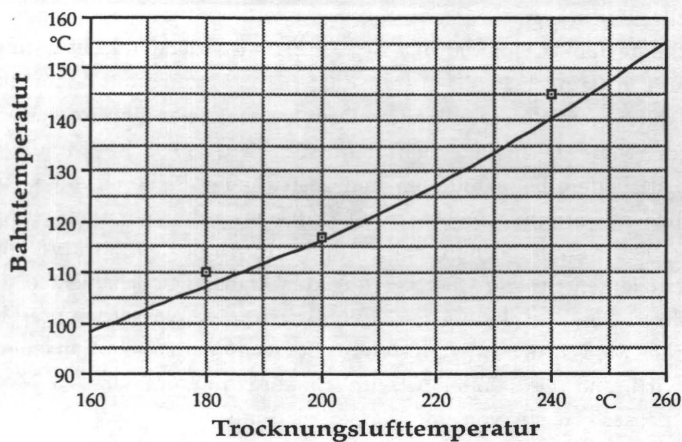


Bild 6.53: Gestrichenes Papier: Gemessene und berechnete Bahntemperaturen in Abhängigkeit der Trocknungslufttemperatur

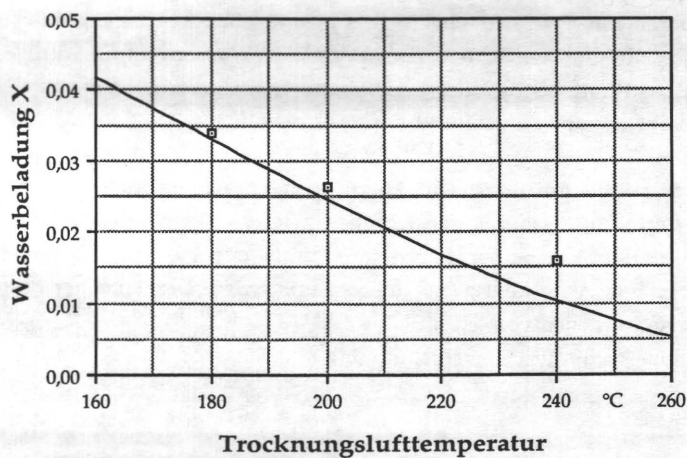


Bild 6.54: Gestrichenes Papier: Gemessene und berechnete Wasserbeladungen in Abhängigkeit der Trocknungslufttemperatur



$v_B$	[m/s]	5,9	5,9	7,8
$t_T$	[s]	1,53	1,53	1,15
$m_B$	[g/m <sup>2</sup> ]	60	60	60
$\rho_B$	[kg/m <sup>3</sup> ]	745	745	745
$s_B$	[ $\mu$ m]	75	75	75
$X_{W,v}$	[kg/kg]	0,066	0,074	0,060
$\vartheta_{\infty I}$	[°C]	193	193	207
$\vartheta_{\infty II}$	[°C]	180	180	190
$\vartheta_{\infty III}$	[°C]	139	139	145
$w_D$	[m/s]	70	70	70
$\vartheta_{B1}$ (gemessen)	[°C]	121	121	112
$\vartheta_{B1}$ (berechnet)	[°C]	122,5	118	112
$X_1$ (gemessen)	[kg/kg]	0,008	0,009	0,009
$X_1$ (berechnet)	[kg/kg]	0,0053	0,0064	0,0084

Tabelle 6.8: Gemessene und berechnete Resultate für ein Naturpapier

#### 6.4.2 Papiertemperatur und Wasserbeladung während der Trocknung

Die zuvor beschriebenen Untersuchungen dienen der Bestimmung der Bahnendtemperaturen und -wasserbeladungen. Die Zustandsänderungen der Papiere im Trockner sind an Produktionsmaschinen dagegen nicht meßbar.

In einer experimentellen Arbeit stellt RÜTHER /6.2/ die Resultate von Laboruntersuchungen zur Rollenoffsettrocknung dar. Darin wird eine Versuchsanlage zur Trocknung einzelner Substratproben beschrieben, die sich wahlweise mit Heißluft oder Wasserdampf als Trocknungsmedium betreiben läßt. Die Proben sind an einer Waage befestigt, so daß deren Massen kontinuierlich bestimmt werden können. Die Messung der Temperaturen des Papiers und des Trocknungsmediums erfolgt mittels Thermoelementen.

U. a. werden der Feuchteverlust und die Temperaturzunahme eines Naturpapiers mit verschiedenen Anfangsfeuchtebeladungen in einer Heißluftströmung gezeigt. Den Versuchen liegen folgende Daten zugrunde:

- Dichte des trockenen Papiers:  $\rho_B = 660 \text{ kg/m}^3$
- Dicke des Papiers:  $s_B = 93 \text{ }\mu\text{m}$
- Trocknungslufttemperatur:  $\vartheta_\infty = 110 \text{ }^\circ\text{C}$
- Anfangstemperaturen:  $\vartheta_{01} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $\vartheta_{02} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$
- Anfangsfeuchtebeladungen:  $X_{01} = 0,056$   
 $X_{02} = 0,108$
- Probenmasse:  $m = 0,181 \text{ g}$  ( $52 \cdot 52 \text{ mm}^2$ )
- Strömungsgeschwindigkeit der Luft:  $v_L = 0,12 \text{ m/s}$

Die dabei erzielten Resultate sind in den Bildern 6.55 und 6.56 als Punkte dargestellt. Zum Vergleich enthalten die Diagramme die mit dem hier vorgestellten Modell berechneten Kurven (durchgezogene Linien). Dazu werden die Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten der längsangeströmten Platte mit laminarer Grenzschicht eingesetzt ( $Re = v_L l / \nu_L$ ;  $Re \approx 300 < Re_K$ ;  $Re_K = 5 \cdot 10^5$ ). Nach /3.10/ ergibt sich:

$$\alpha = \frac{Nu}{l} \frac{\lambda_L}{l} = 0,664 Re^{(1/2)} Pr^{(1/3)} \frac{\lambda_L}{l} \quad (6.9)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{c_{p,L} \rho_L} \left( \frac{a_L}{D_{WL}} \right)^{(2/3)} \quad (6.10)$$

Die berechneten Temperaturen liegen zunächst unter und ab  $t > 30 \text{ s}$  über den gemessenen Werten.

Die im Versuch ermittelten Wasserbeladungen nehmen bei kleinen Trocknungszeiten schneller ab als die der Simulation. Nachdem die Restfeuchten  $X \approx 0,02$  unterschreiten, liegen die gemessenen Werte geringfügig über denen der Rechnung.

Wie die beiden Diagramme zeigen, läßt sich eine recht gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung feststellen.

In weiteren Versuchen wurden mit dem Modellösemittel  $C_{16}H_{34}$  (n-Hexadekan, Siedetemperatur bei  $p = 1 \text{ bar}$ :  $\vartheta_s = 285 \text{ }^\circ\text{C}$ ) getränkte Papierproben (Naturpapier und gestrichenes Papier) in der beschriebenen Versuchsanlage sowohl mit Wasserdampf wie auch mit Heißluft bei  $\vartheta = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  getrocknet (siehe hierzu auch /3.9/). Die wichtigsten Aussagen in komprimierter Form lauten:

1. Bei Verwendung von Wasserdampf haben die Proben vor und nach der Trocknung nahezu die gleiche Wasserbeladung, wohingegen in Heißluft das gesamte Wasser ausgetrieben wird.
2. Die Trocknungsgeschwindigkeit des n-Hexadekans ist (im 1. Trocknungsabschnitt\*) in Wasserdampf um 40 bis 45 % größer als in Luft.
3. In der Wasserdampfatmosphäre werden die Proben schneller erwärmt, da keine Energie für die Desorption von Wasser benötigt wird.

Diese Resultate bestätigen die in Kap. 6.2.6 und 6.3.2 dargestellten Vorteile des Trocknungsmediums Wasserdampf gegenüber der Heißluft.

## 6.5 Anwendbarkeit bzw. Grenzen des Simulationsmodells

Die zuvor beschriebenen Untersuchungen zeigen, daß das vorgestellte Modell die Vorgänge bei der Konvektionstrocknung im Rollenoffsetverfahren hinsichtlich Bahntemperaturen und -wasserbeladungen recht gut simuliert. Ergänzend soll auf die Grenzen der Anwendbarkeit eingegangen werden.

Bei hohen Anfangsfeuchtebeladungen und gleichzeitig großer Wärmezufuhr, hervorgerufen durch große Wärmeübergangskoeffizienten und/oder hohe Trocknungslufttemperaturen, kann der Wasserdampfpartialdruck und somit auch der Gesamtdruck im Papier den Umgebungsdruck überschreiten, so daß die Überlagerung von Gasdiffusion und Molekularbewegung in Strömung mit Molekularbewegung übergeht. Dies gilt insbesondere für gestrichene Papiere mit hohen Diffusionswiderständen, die bei kleinen durchschnittlichen Papierporendurchmessern ( $d < 10^{-7}$  m) oder beidseitigen Druckfarbenbelegungen auftreten. Derartige Strömungsvorgänge werden vom Simulationsmodell nicht berücksichtigt. Sobald der Wasserdampfpartialdruck an einer Stützstelle im Bedruckstoff den Umgebungsdruck erreicht, wird der Programmlauf abgebrochen.

---

\* Im 1. Trocknungsabschnitt verdunstet die Gutsfeuchte an der Gutoberfläche. Unter gleichbleibenden Bedingungen strebt das Gut zunächst einer Beharrungstemperatur zu, bei der es dann mit nahezu konstanter Geschwindigkeit trocknet.

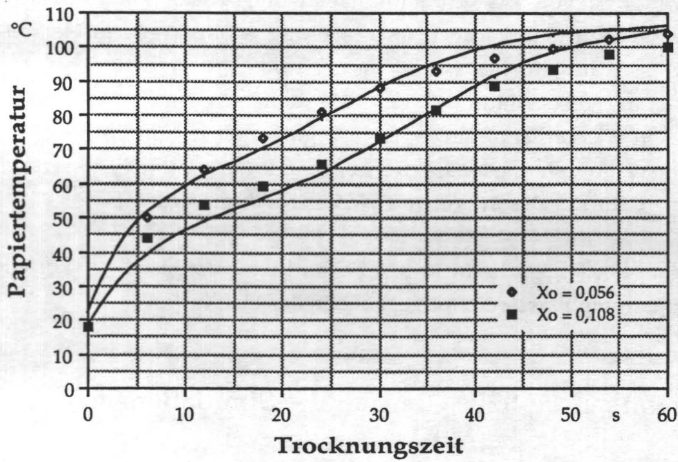


Bild 6.55: Naturpapier: Gemessene und berechnete Temperaturverläufe bei verschiedenen Anfangsfeuchtebeladungen

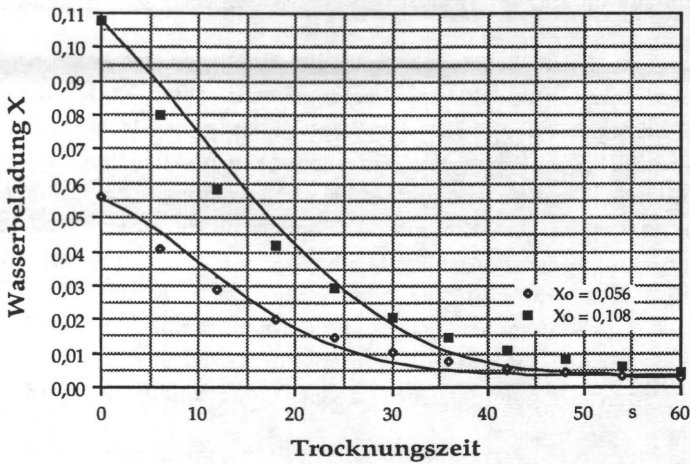


Bild 6.56: Naturpapier: Gemessene und berechnete Wasserbeladungen über der Zeit bei verschiedenen Anfangsfeuchtebeladungen

Die durch die Trocknung hervorgerufene Blasenbildung an Druckprodukten (siehe Kap. 2) zeigt, daß die Erhöhung des Gesamtdrucks im Papier auch an Produktionsmaschinen vorkommen kann.

Des weiteren wird die Gültigkeit des Modells durch die in Kap 6.4.1 beschriebene Zunahme des Diffusionswiderstands im Bereich geringer Wasserbeladungen bei Papieren mit kleinen durchschnittlichen Porendurchmessern eingeschränkt. Hier kann durch Einführung eines beladungsabhängigen Diffusionskoeffizienten Abhilfe geschaffen werden, wofür zusätzliche Untersuchungen erforderlich sind. Da jedoch durch optimale Einstellung der am Trocknungsprozeß beteiligten Einflußgrößen derartig geringe Wasserbeladungen bei Papieren mit kleinen Porendurchmessern nicht auftreten, spielt diese Erhöhung des Diffusionswiderstands für den Praxisbetrieb eine untergeordnete Rolle.

Durch Anpassung der Randbedingungen läßt sich die Anwendbarkeit des Modells auf andere konvektive Trocknungsverfahren der Druck- und Papiertechnik erweitern.

## 7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines mathematischen Modells zur Simulation der Temperatur, des Wasserdampfpartialdruckes und der Wasserbeladung im Papier bei der Konvektionstrocknung im Rollenoffsetverfahren.

Dazu werden die Gleichungen der Massen- und Energieerhaltung sowie die Beziehung für das Sorptionsgleichgewicht aufgestellt. Dabei erfolgt der Transport des Wasserdampfs in den Papierporen durch die Überlagerung von Gasdiffusion und KNUDSENScher Molekularbewegung.

Aus der Ableitung der Modellgleichungen resultieren partielle parabolische Differentialgleichungen, die analytisch nicht lösbar sind. Durch Diskretisierung mit dem Verfahren der finiten Differenzen werden diese partielle Differentialgleichungen in gewöhnliche überführt und mit einem numerischen Predictor-Corrector-Verfahren nach GEAR gelöst. Die diesbezüglichen Berechnungen liefern zu bestimmten vorgewählten Zeitpunkten die Profile der Temperatur, der Wasserbeladung und des Wasserdampfpartialdruckes über der Papierdicke.

Zur Überprüfung der Modellannahmen werden Messungen der Temperaturen und Feuchtebeladungen an Produktionsmaschinen vorgenommen, die eine recht gute Übereinstimmung mit berechneten Werten zeigen.

In Simulationsrechnungen werden die wichtigsten Einflußgrößen der Trocknung für ein Naturpapier und ein gestrichenes Papier untersucht. Die dabei erzielten Resultate liefern die folgenden wesentlichen Erkenntnisse:

Aufgrund der schnelleren Desorption erwärmen sich Naturpapiere unter vergleichbaren Trocknungsbedingungen langsamer und weisen geringere Restfeuchtebeladungen auf als gestrichene Papiere.

Maßnahmen zur Steigerung der Bahntemperaturen wie z. B. längere Trocknerverweilzeiten, höhere Trocknungslufttemperaturen, größere Wärmeübergangskoeffizienten, niedrigere Flächenmassen oder geringere Anfangsfeuchtebeladungen der Papiere führen zu verringerten Restfeuchten der Bedruckstoffe.

Geschwindigkeitsbestimmende Größen für den Trocknungsprozeß sind die Trocknungslufttemperatur und der Wärmeübergangskoeffizient, wohingegen der Einfluß unterschiedlicher Diffusionskoeffizienten als gering einzustufen ist.

Heißlufttrockner mit mehreren Temperaturzonen ermöglichen gegenüber der Einzonentrocknung geringere Bahndendtemperaturen bei gleichzeitiger Einsparung von Energie. Die Bahndendfeuchtebelastung ist dagegen bei beiden Trocknerarten nahezu gleich.

Hohe Bahndemperaturen bei gleichzeitig verringertem Feuchteverlust lassen sich nur durch eine zunehmende Wasserdampfpartialdichte im Trocknungsmedium realisieren. Da weniger Energie für die Desorption gebundenen Wassers benötigt wird, steht ein größerer Anteil der zugeführten Wärme für die Bahnaufheizung zur Verfügung. Zusätzlich steigt die Trocknungsgeschwindigkeit des Druckfarbenverdünnungsmittels gegenüber der Heißlufttrocknung.

Bei hohen Wasserdampfpartialdichten im Trockner besteht die Gefahr von Kondensation auf dem Bedruckstoff, wodurch Bahnabrisse und Glanzverluste an den Druckprodukten auftreten. Diese unerwünschten Begleiterscheinungen lassen sich durch einen Trockneraufbau mit drei verschiedenen Abschnitten vermeiden:

Zone I zur Vorerwärmung der Bahn mittels Heißluft oder Infrarotstrahlung.

Zone II mit Zumischung von Wasserdampf, wobei Dampftemperaturen von lediglich  $\vartheta_{\infty} = 120$  bis  $130^{\circ}\text{C}$  ausreichen.

Zone III zur Entfernung überschüssigen Wasserdampfs von der Bahn mittels Warmluft aus Prallstrahldüsen. Dabei wird der Bedruckstoff bereits vorgekühlt.

Im Vergleich zur Heißlufttrocknung weist die Papierbahn bei Trockneraustritt erhöhte Restfeuchtebelastungen ( $\Delta X = 2\%$  bei gestrichenem Papier,  $\Delta X = 4\%$  bei Naturpapier) und verringerte Temperaturen ( $\Delta \vartheta_B = 12^{\circ}\text{C}$  bei gestrichenem Papier,  $\Delta \vartheta_B = 40^{\circ}\text{C}$  bei Naturpapier) auf.

Abschließend läßt sich feststellen, daß die erhebliche Reduzierung der Papierfeuchte bei der z. Zt. im Rollenoffsetverfahren üblichen Heißluft-Konvektionstrocknung und den verwendeten Farbrezepturen nicht zu vermeiden ist. Die diesbezüglichen Auswirkungen, wie z. B. die Wellenbildung, lassen sich mittels aufwendiger Wiederbefeuchtungsanlagen weitestgehend beheben.

Der Papierfeuchteverlust kann jedoch auch von vornherein vermieden werden, wenn sog. selektive, nur auf die Druckfarbe wirkende Verfestigungsverfahren wie z. B. die Wasserdampftrocknung zum Einsatz kommen. Wesentliche Voraussetzung für die Verwendung von Wasserdampf als Trocknungsmedium ist die Beherrschung dabei möglicher Kondensationserscheinungen.



## 8 Literaturverzeichnis

- /21/ Kröll, K.  
Trockner und Trocknungsverfahren  
Trocknungstechnik, Band 2  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2. Auflage, 1978
- /22/ Walenski, W.  
FOGRA-Symposium: Fehler vermeiden, Kosten sparen  
Offsetpraxis 4/1992, S. 64 - 75
- /23/ Rodriguez-Giles, J.; Köhlmeier, L.  
Zur Trocknung im Rollenoffset  
Hinweise für den Anwender  
Institutsbericht 1/1988, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren,  
TH Darmstadt
- /24/ Köhlmeier, L.  
Der Wasserhaushalt des Papiers bei der Heatset-Trocknung  
FOGRA-Symposium - Trocknung von Druckfarben, München, 22. und  
23.11.1990
- /25/ Köhlmeier, L.; Hars, Chr.  
Wärme- und Stofftransport an Trocknern und Kühlwalzen von Offset-  
Rollenrotationsmaschinen, Teil A  
Institutsbericht 1/1992, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren,  
TH Darmstadt
- /26/ Schuster, C.; Kast, W.  
Wärme- und Stofftransport an Trocknern und Kühlwalzen von Offset-  
Rollenrotationsmaschinen, Teil B  
Institutsbericht 1/1992, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren,  
TH Darmstadt



- /3.1/ Hanke, K.  
Heatset-Druckfarben in der Fortentwicklung: Stand und Perspektiven  
FOGRA-Symposium - Trocknung von Druckfarben, München, 22. und  
23.11.1990
- /3.2/ Klingler, F.  
Anforderungen an Heatset-Trockner bei schnellaufenden Maschinen  
FOGRA-Symposium - Trocknung von Druckfarben, München, 22. und  
23.11.1990
- /3.3/ Wendt, P.  
Trocknung im Rollenoffset-Heatset; Gesamtkonzepte und Perspektiven  
FOGRA-Symposium - Trocknung von Druckfarben, München, 22. und  
23.11.1990
- /3.4/ Stark, E.  
Rollenoffset-Heatset: Druckfarbe, Druckmaschine, Bedruckstoff  
FOGRA-Symposium - Trocknung von Druckfarben, München, 22. und  
23.11.1990
- /3.5/ Wordel, H.  
Trocknungsgrad von Heatset-Druckprodukten: Eine Testmethode  
FOGRA-Symposium - Trocknung von Druckfarben, München, 22. und  
23.11.1990
- /3.6/ -  
Hitzequal, Kälteschock und die Folgen des Heatset  
Druckwelt 7, 10.4.1991, S. 44 - 47
- /3.7/ Falter, K.-A.; Schmitt, U.  
Einfluß der Hitzeeinwirkung beim Druckprozeß auf die Festigkeitseigen-  
schaften und die Dimensionsänderung des Druckpapiers  
FOGRA-Forschungsbericht Nr. 4.035, München, 1989
- /3.8/ Bosse, R.  
Trocknung und Wiederbefeuchtung sind im Zusammenhang zu sehen  
Druckwelt 1, 10.1.1992, S. 54 - 55

- /3.9/ Klemm, H.; Rodriguez-Giles, J.; R  ther, U.  
Einflußgrößen bei der Trocknung von Druckerzeugnissen mit  
  berhitztem Wasserdampf  
Das Papier, 38. Jahrgang, Heft 7, 1984, S. 289 - 295
- /3.10/ Krischer, O.; Kast, W.  
Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik  
Trocknungstechnik, Band 1  
3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1978
- /3.11/ Kr  ll, K.; Kast, W.  
Trocknen und Trockner in der Produktion  
Trocknungstechnik, Band 3  
3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris,  
Tokyo, Hongkong, Barcelona, 1992
- /3.12/ Dosdogru, G.  
Prallstrahltrockner im Vergleich untereinander und mit anderen  
Trocknern  
Deutsche Papierwirtschaft dpw, Nr.1, 1983, S. 3-16
- /4.1/ Karttunen, S.; Karttunen, A.  
Interaction between Paper and Inks  
Graphic Arts in Finland 18, (1989) 1, p. 7 - 13
- /4.2/ Falter, K.-A.  
Klima und Papier  
FOGRA-Praxis-Report Nr. 23, April 1978
- /4.3/ Kast, W.  
Adsorption aus der Gasphase  
Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen und technische Verfahren  
VCH, Weinheim, Basel, Cambridge, New York, 1988

- /4.4/ Mersmann, A.  
Stoffübertragung  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1986
- /4.5/ Rance, H. F. (Hrsg.)  
Handbook of Paper Science  
Volume 2: The Structure and Physical Properties of Paper  
Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York,  
1982
- /4.6/ Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N.  
Transport Phenomena  
John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore,  
1960
- /4.7/ VDI-Wärmeatlas  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 5. Auflage, 1988
- /4.8/ Landolt - Börnstein  
Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie,  
Geophysik, Technik  
2. Band, 2. Teil, Gleichgewichte außer Schmelzgleichgewichte, Bandteil a,  
Springer Verlag, 1960
- /5.1/ Hellmuth, G.; Scheuter, K. R.  
Beitrag zur Technik der Mikrotom-Schnitte von Druckprodukten  
Mitteilungen Heft 2/1980, Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e. V.,  
Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, TH Darmstadt
- /5.2/ Michel, K.; Stüper, J. (Hrsg.)  
Wissenschaftliche und angewandte Photographie  
Band X: Die Mikrophotographie  
Dritte Auflage, Springer-Verlag, Wien, New York, 1967

- /5.3/ Korn, R.; Burgstaller, F.  
Handbuch der Werkstoffprüfung  
Papier- und Zellstoff-Prüfung  
2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1953
- /5.4/ Hell, F.  
Grundlagen der Wärmeübertragung  
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1982
- /5.5/ Lindquist, U.; Virtanen, J.; Salomaa, H.; Heikkinen, J.; Linna, H.;  
Moilanen, P.; Lie, Chr.; Siivonen, T.  
Bessere Auslastung der Zeitungsrotation  
IFRA Special Report 3.6, Darmstadt, 1987
- /5.6/ Kerekes, R. J.  
A simple method for determining the thermal conductivity and contact  
resistance of paper  
Tappi, Vol. 63, No. 9, September 1980, pp. 137 - 140
- /5.7/ Gal, S.  
Die Methodik der Wasserdampf-Sorptionsmessung  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1967
- /5.8/ Beschreibung des MEG Sigma-Plus-Trockners  
MEG, 1988
- /6.1/ Rodriguez-Giles, J.  
Verfahren und Vorrichtung zum Aufbereiten eines zum Trocknen von  
lösungsmittelhaltigen Farben, Lacken, Klebern oder dergleichen auf  
Papier oder vergleichbaren Zelluloseprodukten verwendeten  
Trocknungsmediums  
Deutsches Patent Nr. P 32 29 903. 6 - 44 vom 16.02.1984
- /6.2/ Rütger, U.  
Gleichgewichte und Kinetik des Sorptionsverhaltens von  
Cellulosesubstraten  
Studienarbeit, Paderborn, 1980

## Anhang

## Numerische Lösung der Differentialgleichungen

Das Verfahren der finiten Differenzen zur Überführung der partiellen parabolischen Differentialgleichungen in ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen wurde bereits in Kap. 4.6 ausführlich besprochen und bedarf keiner weiteren Erläuterung.

### Predictor-Corrector-Verfahren

Nachdem es damit gelungen ist, die partiellen, parabolischen Differentialgleichungen in gewöhnliche Differentialgleichungen der Form

$$\frac{\partial y}{\partial t} = f(t, y) \quad (\text{A } 1)$$

zu überführen, kann das System mit dem Predictor-Corrector-Verfahren gelöst werden. Hierbei wird ein explizites Verfahren verwendet, um den unbekannten Wert  $y_{N+1}$  vorherzusagen (Predictor). Mit diesem geschätzten Wert wird im nächsten Schritt mit Hilfe einer impliziten Bestimmungsgleichung der Wert für  $y_{N+1}$  ermittelt (Corrector). Als Beispiel für dieses Vorgehen sei folgendes Schema genannt:

Der Schätzwert von  $y_{N+1}$  wird explizit aus dem mittleren Differenzenquotienten bestimmt:

$$y_{N+1} = y_{N-1} + 2 \Delta t f(y_N) \quad (\text{A } 2)$$

Als Corrector wird die CRANK-NICOLSON-Formel benutzt:

$$y_{N+1} = y_N + \Delta t \frac{f(y_{N+1}) + f(y_N)}{2} \quad (\text{A } 3)$$

Der Vorteil von Predictor-Corrector-Verfahren ist darin zu sehen, daß sie weniger einschränkenden Stabilitätsbedingungen als die expliziten Verfahren unterworfen sind, und darüber hinaus die Notwendigkeit entfällt, wie bei

impliziten Verfahren, ein nichtlineares Gleichungssystem simultan zu lösen.

Das, gebräuchlichste Predictor-Corrector-Verfahren stammt von GEAR und zeichnet sich durch eine nahezu universelle Anwendbarkeit selbst für sehr steife Differentialgleichungssysteme aus.

Das Verfahren ist Bestandteil der NAG-Programmbibliothek und steht als Fortran-Unterprogramm mit dem Namen "D02EBF" an der TH Darmstadt zur Verfügung.

## Das Schema des Rechenprogramms

Das erstellte Rechenprogramm besteht aus einem Hauptprogramm, von dem aus die einzelnen Unterprogramme aufgerufen werden, die ihrerseits weitere Unterrouinen ansprechen. Im Unterprogramm "EIN" werden die benötigten Eingangsgrößen aus einer Eingabedatei eingelesen, wodurch sämtliche Daten ohne Veränderungen im compilierten Programm variiert werden können. Im Hauptprogramm werden nun die Parameter, die den Aufruf des GEARS ermöglichen, festgelegt. Bild A1 zeigt schematisch die Programmorganisation.

Die Unterprogramme "FCN" und "OUT" werden jeweils vom GEAR angesprochen. Sie dienen zur Berechnung der Randbedingungen, der Zeitableitungen des DGL-Systems und zur Steuerung der Ausgabe der Daten in die dafür vorgesehene Ausgabedatei.

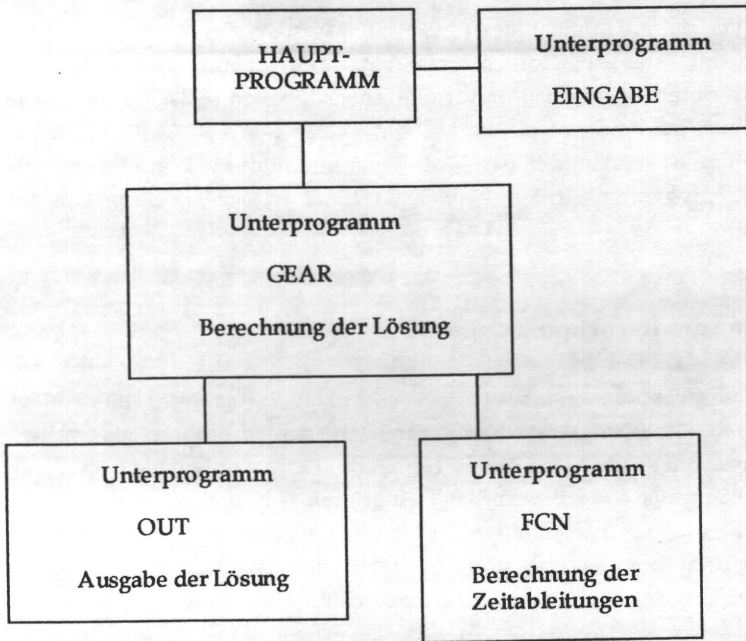


Bild A1: Programmorganisation